Ueber die Temperaturveränderung von Luft und Sauerstoff beim Strömen durch eine Drosselstelle bei 10° C und Drücken bis zu 150 Atmosphären.

Von der

Königl. Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften (Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

Vorgelegt von

Emil Vogel
Diplomingenieur in München.

Referent: Professor Dr. Oscar Knoblauch.
Korreferent: Geheimer Hofrat Professor Dr. C. v. Linde.

Berlin 1910.

Ueber die Temperaturveränderung von Luft und Sauerstoff beim Strömen durch eine Drosselstelle bei 10° C und Drücken bis zu 150 Atmosphären.

Von der

Königl. Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften (Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

Vorgelegt von

Emil Vogel

Diplomingenieur in München.

Referent: Professor Dr. Oscar Knoblauch.
Korreferent: Geheimer Hofrat Professor Dr. C. v. Linde

Berlin 1910.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555407_0035

Ueber die Temperaturveränderung von Luft und Sauerstoff beim Strömen durch eine Drosselstelle bei 10° C und Drücken bis zu 150 Atmosphären[1].

Von **Emil Vogel.**

Die von Thomson und Joule[2]) in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts ausgeführten Versuche über die Abkühlung, welche verdichtete Gase beim Strömen durch eine Drosselstelle erfahren, haben durch Benutzung solcher Abkühlung für die Zwecke der Verflüssigung schwer koerzibler Gase erneutes Interesse gewonnen. Aus einem Vortrage von C. v. Linde[3]) »Ueber die Veränderlichkeit der spezifischen Wärme der Gase« geht ferner die Wichtigkeit dieser Versuche zur Klarstellung des physikalischen Verhaltens der Gase hervor.

Die Beobachtungen von Thomson und Joule wurden bei Temperaturen von 4° bis 100° C und bei Entspannung auf Atmosphärendruck ausgeführt. Der höchste Druck, von dem herabgedrosselt wurde, betrug 64,457 engl. Pfd./Qu.-Z. (4,5 kg/cm²) (siehe Seite 40 Versuch Nr. 6).

Es erschien daher wünschenswert, durch systematische Untersuchungen die Abhängigkeit der auftretenden Temperaturveränderung von Druck und Temperatur innerhalb weiterer Grenzen festzustellen.

Die nachstehend mitgeteilten Versuche, welche im Laboratorium für technische Physik der Kgl. Technischen Hochschule in München in den Jahren 1907 bis 1909 vorgenommen worden sind, beschäftigen sich mit der Abhängigkeit der Abkühlung vom Druck. Die Beobachtungen wurden mit Luft und Sauerstoff angestellt, der Druck bis 150 at gesteigert und eine konstante Druckdifferenz von 6 kg/cm² zwischen Hochdruck- und Niederdruckseite eingehalten. Die Versuche wurden zunächst bei etwa 10° C angestellt, es wurde jedoch die Versuchsanordnung so gewählt, daß ohne große Veränderung derselben zu Beobachtungen bei anderen Temperaturen übergegangen werden kann.

Da bei den angewandten hohen Drücken die genaue Temperaturbestimmung mit großen Schwierigkeiten verbunden ist und Erfahrungen darüber von früheren Forschern nicht vorliegen, so wurde zum Vergleich die Temperatur

---

[1]) Eine vorläufige Mitteilung über die Versuchsergebnisse findet sich: E. Vogel, Ueber die Temperaturveränderungen usw. Sitzungsber. der Kgl. bayer. Akad. der Wissen., math.-phys. Klasse 1909 Abh. 1.

[2]) Thomson und Joule, On the Thermal Effects etc. Phil. Trans. 1853 Seite 357 bis 365; 1854 Seite 321 bis 364; 1862 Seite 579 bis 589.

[3]) C. v. Linde, Sitzungsber. der Kgl. bayer. Akad. der Wissenschaften math.-phys. Klasse 1897 Bd. 27 Heft 3.

zuerst mit Quecksilberthermometern, schließlich mit Widerstandsthermometern ausgeführt. Dazwischen wurde eine Relativmessung mit Thermoelementen vorgenommen.

Infolge der nur geringen Temperaturdifferenz des Gases vor und hinter der Drosselstelle ist es notwendig, eine möglichst vollkommene Wärmeisolierung der Niederdruckseite des Apparates von der Hochdruckseite sowie beider Seiten von der Umgebung anzuwenden, und es wurden mit verschieden guten Wärmeisolatoren vergleichende Versuche angestellt.

Als Endergebnis wurde gefunden, daß sowohl für Luft als auch für Sauerstoff der Kühleffekt linear mit zunehmendem absolutem Druck abnimmt:

für Luft nach der Formel:

$$dt = (0{,}268 - 0{,}00086\,p)\left(\frac{273}{T}\right)^2 dp,$$

für Sauerstoff nach der Formel:

$$dt = (0{,}313 - 0{,}00085\,p)\left(\frac{273}{T}\right)^2 dp,$$

wobei dt die Kühlwirkung bedeutet, dp die Druckdifferenz vor und hinter der Drosselstelle, p den absoluten Druck, gemessen als arithmetisches Mittel aus dem absoluten Druck auf Hochdruckseite und auf Niederdruckseite, T[1]) die absolute Temperatur, gemessen als arithmetisches Mittel aus der absoluten Temperatur auf der Hochdruckseite und der Niederdruckseite.

Die folgende Mitteilung besteht aus den Teilen:

1) Beschreibung des Luftkreislaufes und der einzelnen hierzu erforderlichen Apparate, sowie der Temperaturmessung.

2) Durchführung der Versuche mit Angabe der Zahlentafeln und Berechnungen.

A) Versuche mit Luft bei verschiedenen Wärmeisolatoren: Hartgummi, Porzellan, Messing.

Anwendung von Beckmann-Thermometern, Thermoelementen, Widerstandsthermometern.

B) Versuche mit Sauerstoff bei Hartgummiisolierung.

Anwendung von Widerstandsthermometern.

3) Diskussion der erhaltenen Resultate.

4) Mitteilung der Versuche anderer Forscher und Vergleich der früheren Versuchsergebnisse mit den neu gefundenen Resultaten.

5) Ableitung der Temperaturveränderung an Hand der Zustandsgleichungen von van der Waals und Clausius und Gegenüberstellung der berechneten Temperaturveränderung mit den gefundenen Werten.

6) Einige Folgerungen aus den Drosselversuchen.

Die Jubiläumstiftung der deutschen Industrie und die Gesellschaft für Linde's Eismaschinen ermöglichten in dankenswerter Weise durch Gewährung reicher Mittel die Versuche.

Der Direktion der zweitgenannten Gesellschaft schulde ich außerdem Dank für mancherlei Entgegenkommen, ganz besonderen Hrn. Dr.-Ing. R. Linde, Ingenieur der Linde-Gesellschaft, der mich bei den Sauerstoffversuchen persönlich unterstützte.

[1]) Bei Thomson und Joule bedeutet dagegen T die Temperatur der Luft auf Hochdruckseite.

Für die vielfache Anregung im Verlauf der Versuche möchte ich auch Hrn. Geheimen Hofrat Professor Dr. C. v. Linde und Hrn. Prof. Dr. O. Knoblauch meinen besten Dank aussprechen.

1) Beschreibung des Luftkreislaufes und der einzelnen Apparate.

Als Grundplan wurde angenommen die Einhaltung einer konstanten Druckdifferenz (6 kg/cm²) bei wechselnder Höhe des absoluten Druckes (bis 160 at) und der absoluten Temperatur bei Verwendung eines Luftkreislaufes [1]). Doch wurde der Fall vorgesehen, auch mit zwei anderen Druckstufen 8 und 10 at arbeiten zu können.

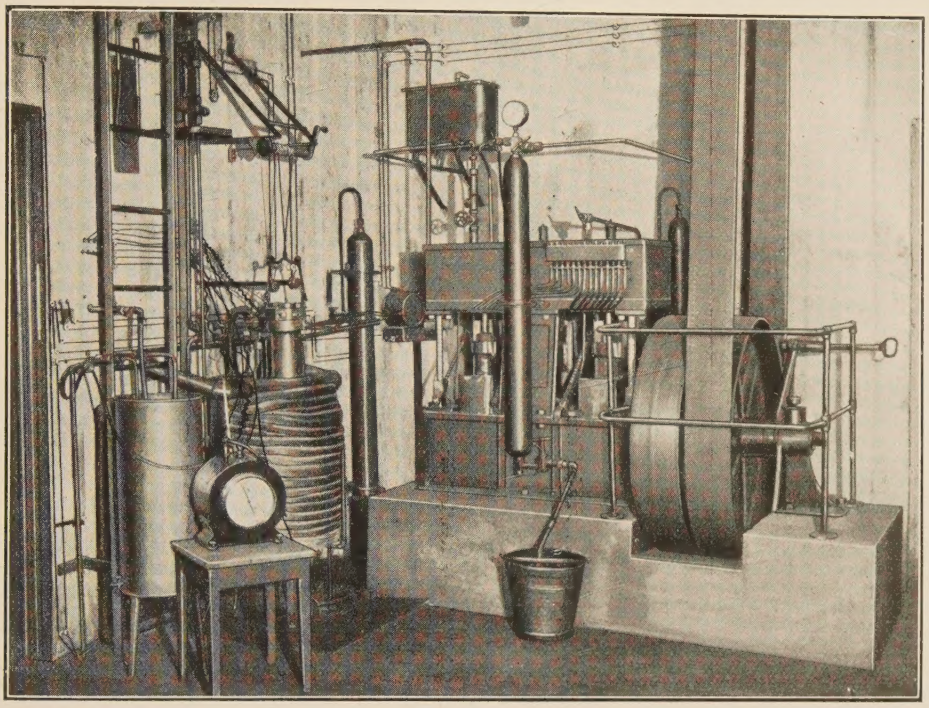


Fig. 1.

Der Entwurf der Anlage und deren Konstruktion wurde vom Leiter des Laboratoriums, Hrn. Professor Dr. O. Knoblauch, im Jahre 1905 dem damaligen Assistenten Dr.-Ing. Julius Adam [2]) übertragen, der auch mit den Versuchen betraut wurde. Durch einen plötzlichen Tod wurde er seiner Tätigkeit entrissen; mit den weiteren Ausführungen der Konstruktionen und der Versuche ist dann der Verfasser beauftragt worden.

[1]) Dieses bei hohen Drücken prinzipiell neue Verfahren wurde von Hrn. Geheimen Hofrat Professor Dr. C. v. Linde vorgeschlagen.

[2]) Es ist meine Pflicht, an dieser Stelle die wertvolle Vorarbeit meines Vorgängers und Freundes hervorzuheben. Durch seine hervorragenden Eigenschaften als Ingenieur und Physiker wäre er für die Lösung der gestellten Aufgabe besonders geeignet gewesen. Sein Tod bildete auch in dieser Beziehung einen schweren Verlust für das Laboratorium. Leider war es mir nicht vergönnt, gemeinsam mit ihm die Vorarbeiten auszuführen, so daß ich bei der Uebernahme der Versuche gezwungen war, eigene Wege einzuschlagen, dies hat natürlich Zeitverlust mit sich gebracht.

Vor Besprechung der einzelnen Apparate sei die Anlage im ganzen dadurch erläutert, daß der Weg der Luft in ihrem Kreislauf an Hand der Zusammenstellung, Fig. 2, verfolgt wird. In der Zeichnung ist der Weg derselben durch Pfeile angedeutet.

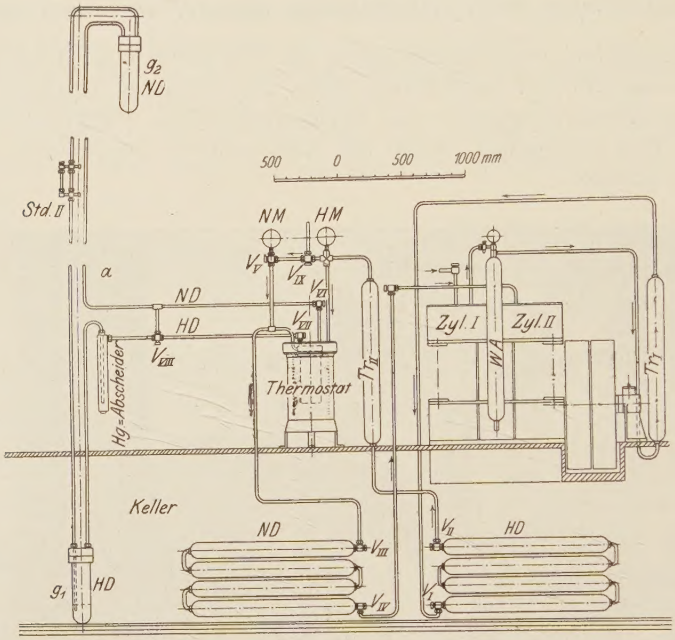


Fig. 2. Druckluftanlage.

Nachdem der dreizylindrige Kompressor auf den beiden Seiten der in dem Durchströmapparat befindlichen Drosselstelle die gewünschte Druckdifferenz hergestellt hat, strömt die Luft (bezw. der Sauerstoff) im Beharrungszustande aus der Niederdruckseite dieses Apparates, der sich in einem Thermostaten befindet, infolge der erlangten Geschwindigkeit mit dem Drucke p_n in die im Keller befindliche Flaschenbatterie *ND* auf Niederdruckseite, wo sie sich mit der in Zylinder I und II des Kompressors geförderten Zusatzluft vereinigt. Von hier wird sie vom mittleren Zylinder III des Kompressors angesaugt und auf die Spannung p_h verdichtet. Infolge der Wasserschmierung des Kompressors ist nun die Luft mit Wasser geschwängert. Dieses muß möglichst vollkommen entfernt werden. Dazu dient vor allem der Wasserabscheider *WA* am Kompressor selbst, wo infolge eines Richtungswechsels der Luftströmung der größte Teil des Wassers sich absetzt. Hierauf strömt die Luft durch eine mit Chlorkalzium gefüllte Trockenflasche Tr_I in die Flaschenbatterie *HD* im Keller auf Hochdruckseite. Weiterhin gelangt die Luft durch eine zweite Trockenflasche Tr_{II} mit Chlorkalziumfüllung in eine Rohrschlange, welche von einem Wasserbade umspült wird, und aus dieser in den Hochdruckteil des Drosselapparates. Dort wird dann bei der Strömung durch den Pfropfen die Spannung p_h auf p_n abgedrosselt.

Die ganze Anlage wurde, besonders bei Anwendung der elektrischen Temperaturmessung, ziemlich ausgedehnt und bestand aus folgenden Teilen:

a) Der dreizylindrige Kompressor,

dessen mittlerer Zylinder zur Erzeugung des Luftkreislaufes und dessen beide äußeren Zylinder zur Förderung von Ersatzpreßluft dienten. Bei der großen Zahl

von Verschraubungen und Ventilen ist ein dauerndes vollständiges Dichthalten der Anlage nämlich nicht zu erzielen, es muß daher immer die verloren gegangene Luft ersetzt werden. Außerdem ist die Förderung von Ersatzpreßluft auch aus konstruktiven Gründen notwendig. Denn mit ihrer Hülfe werden die Kolbenstulpen der Zylinder mit Wasser geschmiert, indem der erste Zylinder mit der Frischluft auch ein wenig destilliertes Wasser ansaugt. Ein Teil dieses Wassers gelangt dann mit der Luft in die beiden anderen Zylinder des Kompressors und besorgt auf diese einfache Weise die Schmierung.

Der Kompressor ist in zwei Zeichnungen abgebildet, die von der ausführenden Firma Whitehead & Co. in Fiume in dankenswerter Weise zur Verfügung gestellt wurden. Fig. 3 zeigt den Aufriß, Seitenriß und die Draufsicht, Fig. 4 den Schnitt durch die drei Zylinder und durch den Wasserabscheider, sowie die Draufsicht auf die drei Zylinder, um die Rohrverbindungen klar hervortreten zu lassen.

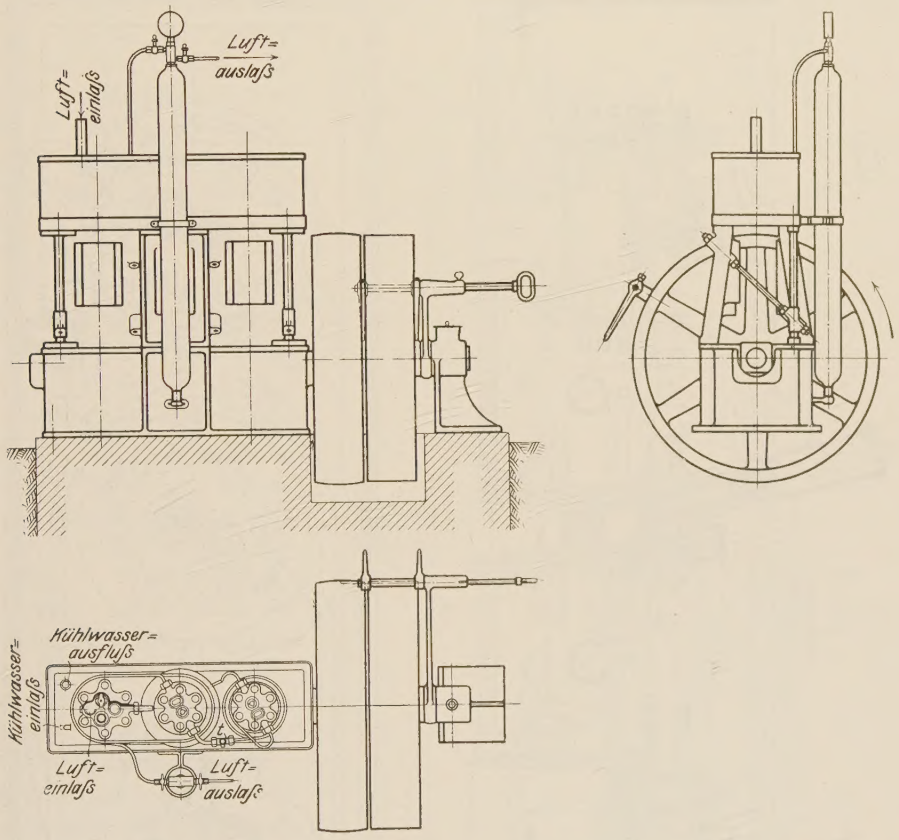


Fig. 3. 1 : 30.

Das Triebwerk der Maschine ist nicht gezeichnet, da es keine außergewöhnliche Ausführung zeigt. Besonders hervorzuheben ist der große mittlere Druck auf den Kreuzkopf des mittleren Zylinders, welcher bei den Versuchen mit 150 at die Luft mit dieser hohen Spannung ansaugte und auf 156 at preßte. Die Gleitbahn erwärmte sich bei Anwendung von 180 at so stark, daß ein Dauerbetrieb bei diesem Druck nicht mehr stattfinden konnte. Dagegen arbeitete die Maschine bis 160 at auch unter diesen schwierigen Umständen sonst tadellos.

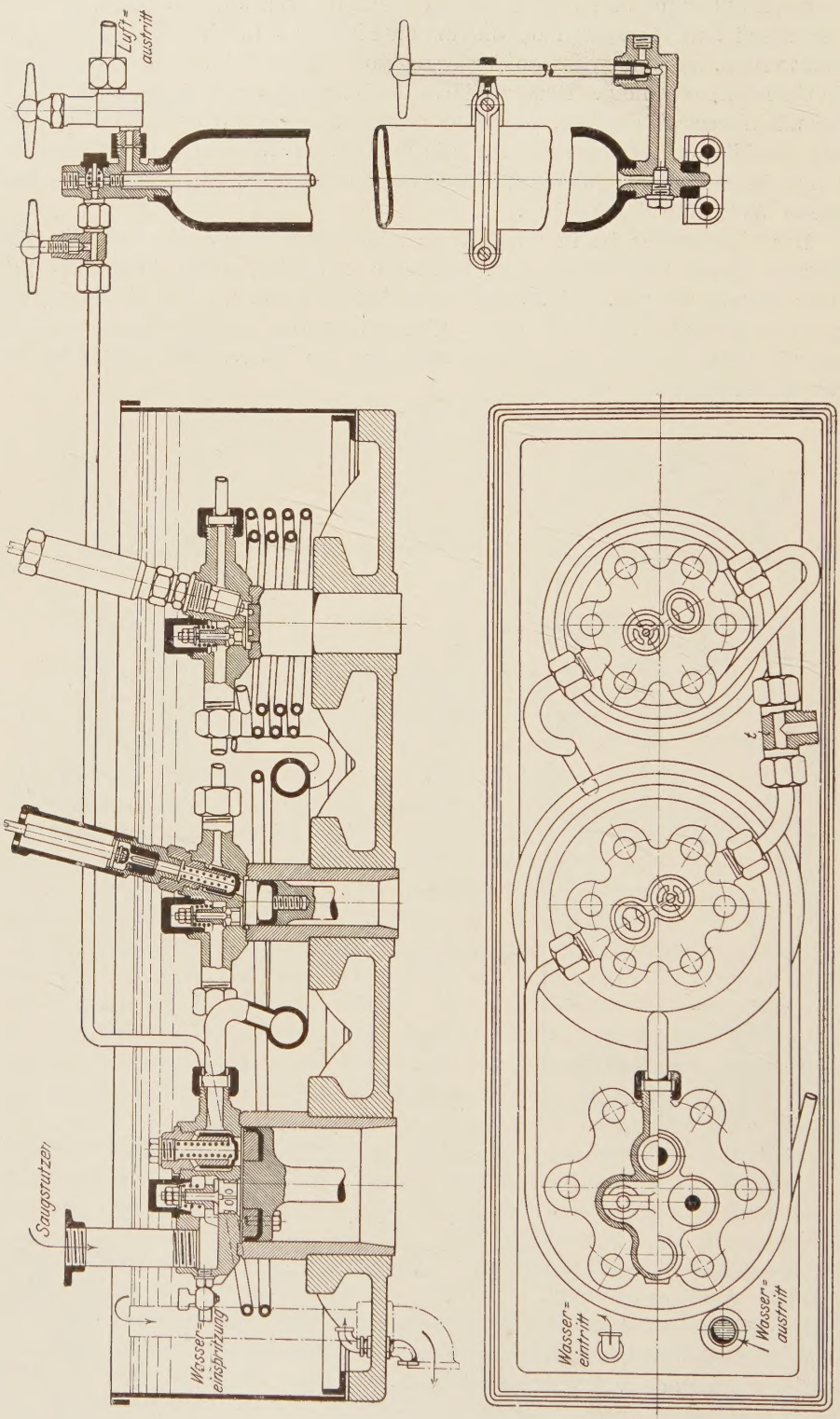

Luft=
austritt
Saugstutzen
Wasser=
einspritzung
Wasser=
eintritt
Wasser=
austritt

Fig. 4. 1 : 7,5.

Die zweistufige Verdichtung in den beiden äußeren Zylindern konnte leicht auf 200 ja 250 at getrieben werden. Die Maschine ist aufs wirksamste gekühlt, alle drei Zylinder und die Deckel werden von Kühlwasser umspült.

Durch das T-Stück *t* (sichtbar in den beiden Fig. 3 und 4, Ansicht auf die Maschine) gelangt sowohl die Luft, welche den Kreislauf vollführt, als auch die Zusatzluft in den mittleren Zylinder und wird von diesem um die Druckdifferenz zwischen Hochdruck- und Niederdruckseite weiter verdichtet. Die Zylinder sind mit Sicherheitsventilen ausgerüstet, zwischen je zwei Zylinder ist ein Aufnehmer aus Kupferrohren eingeschaltet.

Der Kompressor wurde elektrisch angetrieben, der Elektromotor bezog den Strom aus der Stadtzentrale. Wie schon Thomson und Joule bemerkten, sind plötzliche Druckschwankungen sehr schädlich, weil sie Temperaturveränderungen der Luft hervorrufen und dadurch den Beharrungszustand stören. Da nun die Tourenzahl der Maschine infolge der wechselnden Stadtspannung niemals ganz konstant blieb, war es nötig, besondere Vorkehrungen zu treffen, und zwar durch Einschalten zweier Pufferbatterien, bestehend aus je 4 Stahlflaschen von à 30 ltr Inhalt, die hintereinander geschaltet waren, sowie durch das unten auf Seite 16 erwähnte Umlaufventil V_V.

b) Das Hochdruck-differentialmanometer.

Es wäre nicht möglich gewesen, mit Hülfe zweier Hochdruckmanometer eine hinreichend konstante Druckdifferenz einzuhalten. Schwankungen von mehr als 1 bis 2 cm Quecksilberdruck dürfen nicht vorkommen und eine solche Meßgenauigkeit kann nur mit Hülfe eines Quecksilber-Differentialmanometers erreicht werden. In diesem wird die Höhe einer Quecksilbersäule in einem stählernen Steigrohre mit Hülfe eines elektrischen Kontaktes gemessen. Die Höhe derselben entspricht der Druckdifferenz. Fig. 2 zeigt die Zusammenstellung des Differentialmanometers, Fig. 5 die Einzelheiten.

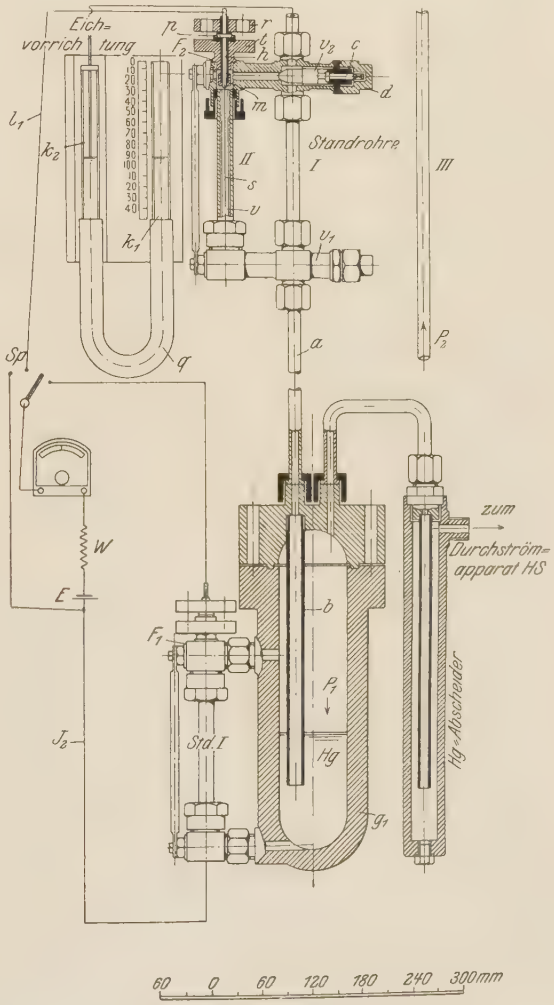


Fig. 5

Das Manometer besteht aus zwei starkwandigen Stahlgußgefäßen g_1, g_2, die durch ein Standrohr miteinander verbunden sind und sich im Keller bezw. auf dem Dachboden des Laboratoriums befinden. Das stählerne Standrohr a von 9 mm lichter Weite hat im Deckel des unteren Gefäßes eine Verlängerung b, welche in Quecksilber taucht. Zwischen den beiden Gefäßen sind am Standrohr a in Höhen, welche 6 at, 8 at und 10 at entsprechen, verschließbare Stände angeordnet, in denen die Höhe der Quecksilbersäule durch einen elektrischen Kontakt angezeigt wird. Ein ebensolcher Stand ist am unteren Quecksilbergefäß vorhanden. Dieses untere Gefäß wird mit der Hochdruckseite, das obere mit der Niederdruckseite des Durchströmapparates verbunden.

Auf einige Einzelheiten soll noch hingewiesen werden. Als Konstruktionsprinzip war der Gedanke maßgebend, daß auch während des Versuches, wenn sowohl der Durchströmapparat als auch das Differentialmanometer unter hohem Druck stehen, die Möglichkeit vorhanden sein muß, das Manometer zu eichen. Ferner muß die Konstruktion so durchgeführt werden, daß bei Undichtheiten, die nie ganz vermieden werden können, das austretende Quecksilber keinen störenden elektrischen Schluß geben kann.

Die erste Forderung wurde dadurch erfüllt, daß jeder Stand für sich durch zwei Ventile v_1 und v_2 vom übrigen Teil des Manometers abgesperrt werden kann. Um lästigen Undichtheiten vorzubeugen, wird jede Ventilspindel c durch eine Kappe d umschlossen, die als Blindverschluß dient und erst entfernt werden muß, wenn die Ventilspindel gedreht wird (vergl. Stand II in Fig. 5).

Die zweite Forderung wurde durch die Ausbildung gelöst, welche der Fassung des elektrischen Kontaktstückes gegeben wurde.

Den genauen Quecksilberstand gibt auf Anregung von Fräulein Hilde Mollier die Eintauchtiefe eines Graphitstiftes s von 18 cm Länge an, dessen elektrischer Leitungswiderstand ein Vergleichsmaß bildet. Dieser Stift s steckt in einem stählernen Halter h, an den eine Dichtungsplatte p angedreht ist. Eine Ueberwurfmutter m aus Hartgummi sorgt für eine gute Klemmung des Graphits im geschlitzten Stahl. Der Halter h seinerseits wird wiederum von Hartgummi umschlossen und durch eine Brille r mit zwei kräftigen Schrauben in eine Stahlfassung t gepreßt, welche dann in das obere Vierkant des Standes eingeschraubt ist. Vor einer Berührung des Graphitstiftes mit der Metallwandung des Rohres schützt ein eingesetztes Glasrohr v. Vom Halter h mit dem Bleistift s führt eine Leitung l_1 zu einem Pol einer elektrischen Batterie E, der andere Pol derselben ist vermittels der Leitung l_2 mit dem Stand I selbst des Manometers verbunden und damit im dauernden Kontakt mit dem Quecksilber. In der einen Leitung l_1 befindet sich ein Millivoltmeter mit einem Vorschaltwiderstand w und ein Stromschlüssel Sp, welcher erlaubt, die Ausschläge des Zeigerinstrumentes an den einzelnen Ständen zu beobachten und die Spannung der Stromquelle zu kontrollieren. In der Zeichnung in Fig. 5 sind drei Kontakte angegeben, der äußerste rechts dient zur Bestimmung der Eintauchtiefe des Graphitstiftes für den Stand I am unteren Gefäß, der mittlere für den Stand II, welcher 6 at entspricht, der äußerste links dient zur Kontrolle der Spannung der Stromquelle E. Diese muß am Millivoltmeter immer den gleichen Ausschlag erzeugen.

Zur Eichung des Manometers ist die folgende Einrichtung getroffen.

Vom Kellergeschoß, wo das untere Gefäß sich befindet, bis zum oberen Gefäß reicht eine eiserne Meßlatte, in unmittelbarer Nähe des Steigrohres des

Manometers angebracht. Mit Hülfe eines Schlittens, der auf der Latte verschoben werden kann, wird am Manometer je eine Marke am Stand I und Stand II eingestellt und die Entfernung derselben vom Nullpunkt der Latte am Schlitten sodann in Millimetern abgelesen. Als eine solche Marke nimmt man zweckmäßig die Dichtungsfläche der Fassung an, welche den Graphitwiderstand enthält, beispielsweise die Dichtungsfläche F_2 am Stand II und F_1 am Stand I. Auf diese Weise erhält man rasch die Entfernung der Dichtungsfläche F_1 am Stand I zur Dichtungsfläche F_2 am Stand II.

Außerdem ist für die gesuchte Höhe der Quecksilbersäule noch maßgebend, wie weit die beiden gleich langen Graphitstifte ins Quecksilber eintauchen. Dazu setzt man die herausgeschraubte Fassung mit dem Graphitstift in ein Glasrohr k_1, in dem sich Quecksilber befindet, dessen Niveau verändert werden kann durch Heben und Senken eines zweiten Glasrohres k_2, welches mit dem Rohr k_1 durch einen Schlauch verbunden ist. Somit kann in k_1 jede Eintauchtiefe des Stiftes s erzielt werden. Durch das Rohr k_2 führt eine Stromzuführung von der Stromquelle E in das Quecksilber und man erhält für verschiedene Einstellungen des Quecksilberspiegels infolge der verschiedenen Eintauchtiefen des Graphitstiftes verschiedene Ausschläge am Millivoltmeter. Umgekehrt kann man dann aus den Ausschlägen des Instrumentes auf die Eintauchtiefe schließen, wenn die Graphitstifte im Manometer eingeschraubt sind. Die zahlenmäßige Berechnung der Höhe der Quecksilbersäule findet sich beispielsweise in den Zahlentafeln 1 bis 4 auf S. 22 bis 25 angegeben.

Als Graphitwiderstand bewährte sich eine Koh-I-Noormine, wie sie in den Bleistiften benutzt wird. Als Armaturteil am Differentialmanometer sieht man auf den Zeichnungen einen Quecksilberabscheider. Derselbe erwies sich als notwendig, da bei unrichtiger Handhabung der Hähne der Preßluftanlage oder bei einem plötzlichen Stillstand des Kompressors die Druckdifferenz zwischen Hochdruck- und Niederdruckseite sich plötzlich ausgleicht. Dann fällt die Quecksilbersäule rasch ins untere Gefäß g_1, und durch die strömende Luft gelangt Quecksilber in den Hochdruckteil des Durchströmapparates. Um dies zu vermeiden, ist ein Gefäß in die Leitung, die vom unteren Gefäß zum Apparat führt, eingeschaltet. In diesem wird sich wegen der erzwungenen Richtungsänderung des Luftstromes das Quecksilber absetzen.

Von den übrigen Teilen der Anlage kann das Manometer durch die Ventile V_{VI} und V_{VII} (siehe Fig. 2) abgeschlossen werden. Um den Druck im Manometer unter Umständen nach Abschluß der oben genannten Ventile für sich ausgleichen zu können, ist ein Umlaufventil V_{VIII} eingebaut.

c) Das Wasserbad.

Um eine gute Konstanz der Lufttemperatur im Durchströmapparat zu erreichen, wurde der Luftstrom durch eine Rohrschlange, welche von fließendem Wasserleitungswasser umspült war, zum Apparat geleitet. Die Rohrschlange s in Fig. 6 im Schnitt gezeichnet hat eine Länge von 12 m und 9 mm lichte Weite, der Lufteintritt in die Spirale erfolgt unten im Wasserbad. Das Gefäß mit der Rohrschlange und dem hineingehängten Durchströmapparat zeigt Fig. 6. Es soll später auch für Bäder mit hoher Temperatur verwendet werden, besteht aus Stahlblech, ist doppelwandig und wird durch Umhüllen mit Isolierstoff vor

Wärmeeinfluß von außen geschützt. Die beiden Oeffnungen *o* im Luftmantel (siehe Querschnitt) sollen bei hohen Temperaturen als Abzug der Heizgase dienen, geheizt wird dann durch eine darunter gestellte Gasbatterie. Im vorliegenden Falle wurde durch einen an die Wasserleitung angeschlossenenSchlauch, der, von oben eingeführt, bis an den Grund des Gefäßes reichte, Wasser dauernd eingelassen. Dieses stieg in die Höhe und strömte dann durch das Standrohr *w* ab. Durch einen Quetschhahn konnte die Zuflußmenge sehr fein einreguliert und dadurch die Lufttemperatur in der Rohrschlange konstant gehalten werden. Mitunter wurde zum Konstanthalten der Badtemperatur auch eine kleine Gasflamme benutzt. Bei den Voruntersuchungen über die Widerstandsfähigkeit des Durchströmapparates und der verwendeten Wärmeisolatoren kamen zeitweise auch hohe Temperaturen bis 400° C zur Anwendung, so diente das Gefäß abwechselnd beiden Zwecken. Um einen guten Wärmeübergang zwischen Bad und Rohrschlange zu erreichen, ist ein Rührwerk *R* eingebaut, das durch einen kleinen Elektromotor mit Riemenübersetzung angetrieben wird.

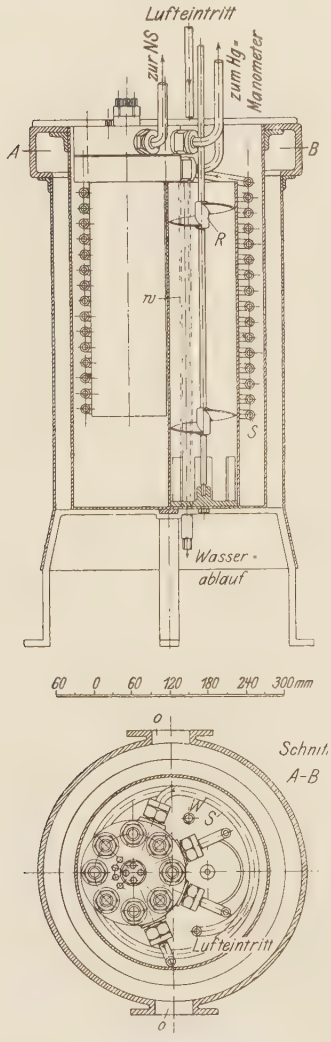


Fig. 6.

d) Der Durchströmapparat

bildet sowohl in technischer als auch physikalischer Beziehung den interessantesten Teil der Anlage. Eine genaue Untersuchung der verschiedenen Umstände hat gezeigt, daß die Konstruktion des Apparates die Resultate sehr stark beeinflussen kann, so daß ganz falsche Schlüsse gezogen werden könnten.

Der Apparat ist in zwei verschiedenen Ausführungsarten in Fig. 7 und 8 im Querschnitt und Längsschnitt abgebildet.

Da die Versuchsanordnung in ihren Grundzügen auf derjenigen von Thomson und Joule fußt, so möge deren Anordnung hier kurz besprochen werden.

Der Kreislauf der Luft wurde auch damals durch einen Kolbenkompressor, der von einer Dampfmaschine betrieben wurde, bewirkt; als Druckregler diente ein Gasometer. Die Temperaturkonstanz besorgte ein Wasserbad, das unter Umständen mit eingeleitetem Dampf geheizt wurde.

Die verdichtete Luft gelangte durch eine im Bade liegende Kupferrohrspirale zur Drosselstelle. Diese bestand aus einem Baumwolle- oder Seidepfropfen, der in einem Holzrohre fest zusammengepreßt wurde. Beim ersten Apparat, den die Forscher benutzten, war um das Holzrohr noch eine gute Isolierung aus Watte verwendet; bei einem späteren zweiten Apparate wurde sie weggelassen, da die Trägheit des Apparates in bezug auf Temperaturveränderung allzu groß war. Die Temperatur des Luftstromes wurde nur auf Niederdruckseite durch ein Quecksilberthermometer gemessen. Da die Durch-

gangsgeschwindigkeit der Luft durch die Kupferspirale nur gering war und Kupfer die Wärme sehr gut leitet, so konnte angenommen werden, daß vor der Drosselstelle Luft- und Badtemperatur identisch seien; die letztere wurde gemessen.

Die Anwendung von einem Holzrohr gewährleistete eine gute Isolierung und ist bis etwa 100° C und wenigen Atmosphären Druck sehr geeignet. Vorzuziehen jedoch ist wegen seiner Trockenheit Hartgummi; dieses ist allerdings nur bei niederen Temperaturen verwendbar. Im vorliegenden Falle wurde bei der Konstruktion des Apparates die Forderung gestellt, derselbe solle auch für hohe Temperaturen geeignet sein, bis etwa 500° C und für Probedrücke bei dieser Temperatur bis 250 at.

Unter diesen schwierigen Umständen war einerseits geboten, alle Teile, die hohen Druck auszuhalten hatten, aus bestem Stahl zu verfertigen; denn bei 500° C beträgt dessen Festigkeit nurmehr 50 vH von derjenigen bei normaler Temperatur. Bei sehr hohen Temperaturen war außerdem zu befürchten, daß die Badetemperatur nicht mehr vollkommen mit der Lufttemperatur auf der Hochdruckseite übereinstimmt; es ergibt sich daher als Notwendigkeit, die Temperatur auf beiden Seiten der Drosselstelle zu messen. Ebenso muß die Druckdifferenzmessung in möglichster Nähe des Drosselpfropfens stattfinden, wie dies bereits von Thomson und Joule geschehen ist.

Für die Temperaturmessung wurden zuerst Quecksilberthermometer vorgesehen, allerdings brachten diese die Anwendung von Thermometerrohren mit sich, denn ohne Schutz konnte man bei den hohen Drücken die Glasthermometer nicht einsetzen. Es wurde zuerst diese Temperaturmessung gewählt, weil vorauszusehen war, daß unter den gegebenen Verhältnissen auch die elektrischen Temperaturmessungen Schwierigkeiten bieten würden.

In Fig. 7 ist der erste Apparat in zwei Schnitten gezeichnet, er besteht aus Nickelstahl und wurde von Whitehead in Fiume geliefert.

Der Hochdruckteil *M* und der Niederdruckteil *N* werden miteinander durch einen Krümmer *K* verschraubt, so daß beide Thermometerrohre lotrecht stehen. Da infolge der Entspannung der Luft auf der Niederdruckseite eine niedrigere Temperatur herrscht als auf der Hochdruckseite, so bildet sich naturgemäß ein Wärmestrom durch die Berührungsfläche der Wand der Hochdruck- mit der Niederdruckseite von ersterer zu letzterer aus. Es wurde daher versucht, die beiden Apparateteile durch einen zwischengelegten Wärmeisolator voneinander zu trennen, so daß der Wärmefluß nicht ohne weiteres aus den Eisenteilen der Hochdruckseite des Apparates in die der Niederdruckseite gelangen könnte. Konstruktiv ist dies schwierig zu erreichen und der Apparat wird sehr vielteilig, außerdem war es nicht möglich, einen geeigneten Isolator ausfindig zu machen. Da die Verschraubungen sehr kräftig angezogen werden mußten, so trat entweder sofort oder

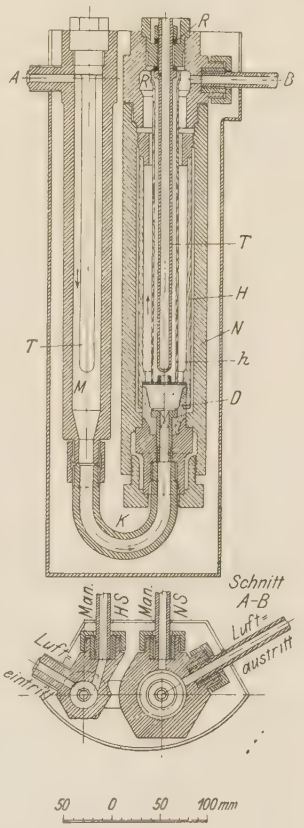


Fig. 7. Durchströmöffnung I.

bei Unterdrucksetzung des Apparates ein Bersten des Isoliermaterials ein. Versucht wurden: Porzellan, Hartgummi, Holz, Steckolit (wie es bei den Zündkerzen der Explosionsmotoren Anwendung findet), Xylolith (eine besonders präparierte Holzart) und Granit. Da sich außerdem zeigte, daß es für hohe Temperaturen unbedingt notwendig ist, die Verschraubungen auf ein Minimum zu reduzieren und alle nach oben hin zu verlegen, so wurde dieser Apparat weiterhin nur für niedere Temperaturen eingerichtet und mit ihm nur Versuche bei gewöhnlicher Temperatur vorgenommen. Die dabei gewonnenen Resultate und Erfahrungen konnten dann als Basis für eine weitere Anordnung dienen, welche in Fig. 8 dargestellt ist.

Im ersten Apparat ist, wie aus Fig. 7 ersichtlich, das Thermometerrohr auf Hochdruckseite vom Eisenkörper nicht isoliert, auf Niederdruckseite jedoch durch zwei Hartgummiringe *R*. Da diese, wenn einmal montiert, nicht mehr gelockert zu werden brauchen und außerdem leicht ersetzt werden können, ohne daß der übrige Apparat auseinandergenommen werden muß, so machten sie weiter keine Schwierigkeiten. Die Thermometerrohre wurden mit Quecksilber gefüllt, um den Wärmeübergang zum Thermometer zu erleichtern.

Der ganze Drosselvorgang spielt sich vollständig in einer mit Asbest gefüllten Holzdüse *D* ab, welche gleich wie die übrigen noch zu erwähnenden Holzteile des Apparates nur geringen Druck auszuhalten hat. Den ganzen absoluten Druck nehmen nur die Eisenteile auf und die oben genannten Hartgummiringe. Um die Wärmewirkungen der Wand der Niederdruckseite des Apparates auf die durchströmende Luft möglichst unschädlich zu machen, sind zwei konzentrische Holzrohre *H* und *h* vorhanden. Von der strömenden Luftmasse wird nur die Temperatur des inneren Kernes gemessen. Der Asbest befindet sich zwischen zwei Messingsieben, von denen das obere durch das Holzrohr *H* mit Hülfe einer Schraube angepreßt wurde.

Der ganze Apparat ist außen von einem Blechmantel umschlossen, die Zwischenräume zwischen diesem und dem Durchströmapparat waren gut mit Schafwolle ausgefüttert.

Der Apparat ergab folgende Resultate im Betriebe:

Wie schon bei der Anordnung von Thomson und Joule zeigte sich auch hier, daß infolge der vielen Wärmeisolatoren der Apparat nur sehr langsam den Temperaturschwankungen folgt, daher dauert es sehr lange, bis sich der Beharrungszustand einstellt. Bei hohen Drücken ist dieser Umstand etwas weniger störend, weil eine große Luftmasse durch den Apparat hindurchströmt und dies auf die Erreichung des Beharrungszustandes einen günstigen Einfluß ausübt. Sehr ungünstig machte sich der Umstand geltend, daß die Hochdruckseite keine Wärmeisolatoren enthält, während die Niederdruckseite durch den Einbau der Holzrohre sehr gut gegen den Wärmeeinfluß von außen geschützt ist. Daher bewirken die Temperaturschwankungen des Bades auf beiden Seiten der Drosselstelle Temperaturschwankungen der Luft von verschiedener Amplitude. Will man daher einwandfreie Ergebnisse erzielen, so ist es notwendig, größere Temperaturschwankungen des Bades zu vermeiden und den Versuch auf eine lange Zeitdauer auszudehnen.

Die mit diesem Apparat gefundene Abhängigkeit zwischen Kühleffekt und Druck wurde auch mit dem zweiten Apparat ermittelt. Die Konstruktion eines solchen auf Grund der erworbenen Erfahrung war um so notwendiger, als Versuche mit anderen Gasen vorgenommen werden sollten, welche nicht in unbeschränkten Mengen zur Verfügung stehen und daher eine rasche Temperatureinstellung und eine nicht zu lange Versuchsdauer notwendig wird.

In nebenstehender Fig. 8 ist der neue Apparat im Längsschnitt und zwei Querschnitten abgebildet. Derselbe besteht aus Siemens-Martinstahl und wurde von der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg geliefert.

Vor allem ist ersichtlich, daß alle äußeren Verschraubungen nach oben verlegt sind, wodurch allerdings der äußere Mantel und die Deckelschrauben stark beansprucht werden. Letztere sind so berechnet, daß unter Umständen dort ein Nachgeben stattfindet.

Die Lufttemperatur wird unmittelbar vor und hinter der Drosselstelle gemessen; die Hochdruck- und Niederdruckseite des Apparates sind ganz analog isoliert durch ein dickeres äußeres Rohr *H* und durch ein dünneres inneres *h*, welches wie beim ersten Apparat die Luft in zwei konzentrische Ströme teilt. Auch die durchlöcherten Scheiben, zwischen denen die Drosselstelle aus Asbest sich befindet, bestehen jeweils aus dem gleichen Isolationsmaterial, wie die Rohre *H* und *h*. Durch Anziehen der oberen Druckschraube *S* nach Herausnahme des oberen Thermometers kann ohne weitere Demontage der Pfropfen stärker gepreßt werden.

Der ganze Apparat wird ohne weitere Hülle ins Bad gesenkt, der Beharrungszustand stellt sich daher sehr rasch ein. Infolge der symmetrischen Isolierung war es auch nicht mehr notwendig, während des Versuches für eine ganz konstante Badtemperatur zu sorgen. Alle Isolatoren haben nur die Druckdifferenz auszuhalten, so daß auch Porzellan angewendet werden konnte.

Als Nachteil ist anzusehen, daß, um zum unteren Thermometer zu gelangen (Widerstandsthermometer oder Thermoelement) der Apparat demontiert werden muß.

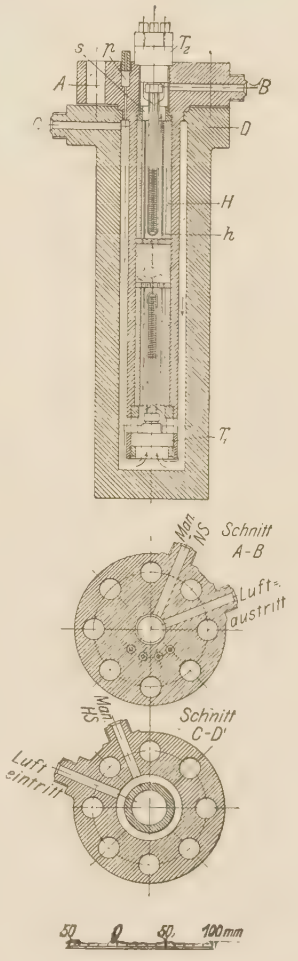


Fig. 8. Durchströmapparat II.

Die Luft strömt bei diesem Apparat oben ein, umspült das Rohr, das die Niederdruckseite und Hochdruckseite enthält und fließt dann von unten nach oben durch die Hochdruckseite und Drosselstelle in die Niederdruckseite, diese verläßt sie durch eine Bohrung im Deckel.

Die Messung des absoluten Druckes sowie der Druckdifferenz machte bei beiden Apparaten keinerlei Schwierigkeiten. In den Zeichnungen sind die betreffenden Rohranschlüsse und Verbindungen ohne weiteres zu ersehen. Erstere geschah mit Hülfe zweier Manometer und zwar bei niederen Drücken mit einem doppelt zeigenden Kontrollmanometer, bei hohen Drücken über 20 at mit Hochdruckmanometern in 2 at-Intervall geteilt, so daß 0,5 at noch geschätzt werden konnten. Wie die Versuchsgenauigkeit lehrt, genügt das vollkommen.

e) Besondere Rohrleitungen (siehe Fig. 2).

Kurz vor Eintritt in die Schlange, welche zur Kühlung der strömenden Luft im Bade dient, führt eine Rohrleitung zum Manometer *HM* auf Hochdruck-

seite, ebenso führt nahe am Austritt aus dem Durchströmapparat eine Leitung zum Manometer NM auf Niederdruckseite.

Beide Manometer können durch ein Reguliernadelventil V_V miteinander verbunden werden. Durch dasselbe war es möglich, auch bei schwankender Leistung des Kompressors (vergl. S. 9) doch eine konstante Druckdifferenz zwischen Hochdruck- und Niederdruckseite einzuhalten. Die Menge der durch V_V strömenden Luft wird unter Beobachtung des Ausschlages am Millivoltmeter des Differentialmanometers dauernd geregelt.

Die durch diesen Nebenschluß strömende Luft gelangt gar nicht in den Durchströmapparat und stört mithin in keiner Weise den Beharrungszustand. Außerdem befindet sich dort ein weiteres Ventil V_{IX}, durch welches Druckluft in die freie Atmosphäre gelassen werden kann, dadurch wird der absolute Druck konstant gehalten. Beide Arten der Regulierung müssen langsam und stetig vorgenommen werden.

Das Differentialmanometer ist seinerseits durch möglichst kurze Leitungen mit den entsprechenden Seiten des Apparates verbunden.

Vorrichtungen besonderer Art mußten noch bei den Untersuchungen mit Sauerstoff angewendet werden, da es nicht angängig war, beim Regulieren den Ueberschuß in die Luft ausfließen zu lassen.

Der Zylinder I des Kompressors wurde durch ein weites Rohr mit einem großen Gummibeutel, wie er bei Gasmotorenanlagen verwendet wird, verbunden Dieser war außerdem mit zwei Sauerstoffflaschen in Verbindung und noch mit dem Ventil V_{IX} der Anlage, das sonst die geförderte überschüssige Luft in die freie Atmosphäre ausströmen läßt. Der Anschluß der beiden Sauerstoffflaschen war derart, daß jede derselben mit einer neuen ausgewechselt werden konnte, während die andere den Betrieb aufrecht erhielt. Es wurde so reguliert, daß einerseits der absolute Druck und die Druckdifferenz konstant blieben und andererseits der Gummibeutel doch immer prall mit Sauerstoff gefüllt blieb, da sonst der Kompressor Luft durch die Kolbenstulpen und sonstige Undichtheiten angesaugt hätte. Dies mußte absolut vermieden werden.

Nach einiger Uebung gelang diese etwas umständliche Regulierung durch Heranziehen einer Hülfskraft vollkommen.

f) Die Temperaturmessung.

Wesentliche Schwierigkeiten bot die Temperaturmessung; einerseits da die Temperaturdifferenzen nur sehr gering sind und andererseits die hohen Drücke den Einbau der Thermometer überaus erschweren. Auch die elektrischen Methoden bieten infolge dieser Umstände manchen Nachteil, während sie sonst wegen der Genauigkeit in neuerer Zeit fast immer bevorzugt werden.

Ihrer leichten Kontrolle halber und als Vorstudium wurden Quecksilberthermometer nach Beckmann gewählt.

In Fig. 9 ist eines der benutzten Beckmann-Thermometer dargestellt. Zur Verwendung kamen drei Stück. Eines diente zum Messen der Wasserbadtemperatur, die beiden anderen befanden sich in den Thermometerrohren auf Hochdruck- bezw. Niederdruckseite. Außerdem wurde die absolute Höhe der Temperatur des Bades mit einem normalen, in $0{,}2^0$ geteilten Thermometer gemessen. Die Beckmann-Thermometer ergaben dann die Temperaturdifferenzen der einzelnen Meßstellen untereinander und zeigten vor allem sehr deutlich die Schwankungen an.

Hergestellt waren die Thermometer bei C. Richter in Berlin, eines davon wurde in der Reichsanstalt geprüft, die anderen dann mit ihm im Laboratorium für technische Physik verglichen. Diese Thermometer sind in $0{,}01^0$ geteilt, so daß mit der Lupe $0{,}001^0$ zu schätzen sind. Die Korrektionen blieben innerhalb der dritten Dezimale. Bei diesen Thermometern, die bekanntlich mit veränderlicher Quecksilberfüllung benutzt werden, ist natürlich auch der jeweilige Gradwert zu berücksichtigen. Vor dem Versuch wurde die Einstellung der vier Thermometer im Wasserbade beobachtet.

Obgleich die Beobachtungen mit den geschilderten Thermometern gute Resultate geliefert hatten, sah man sich gezwungen, später elektrische Temperaturmessung anzuwenden, hauptsächlich wegen der notwendigen neuen Konstruktion des Durchströmapparates.

Ohne weiteres ist eine Entscheidung, ob im vorliegenden Fall Thermoelemente oder Widerstandsthermometer geeignet seien, nicht möglich. Im allgemeinen sind Thermoelemente für Differenzmessungen ja sehr zweckmäßig.

Bei der Wahl ergaben sich folgende Gesichtspunkte als maßgebend:

1) Die Messung der Lufttemperatur soll nicht nur in einem einzelnen Punkt stattfinden, da infolge von örtlichen Drosselungen und Wirbelungen besondere Temperaturerscheinungen eintreten können, sondern die Messung soll den Luftstrom über eine gewisse Länge hin integrieren.

2) Die verwendeten Meßvorrichtungen müssen leicht zu entfernen sein und rasch nachgeprüft werden können.

3) Da die Beobachtungsinstrumente (Spiegelgalvanometer und Fernrohr mit Skala) wegen der Erschütterungen infolge des Kompressorganges in einem anderen Raum aufzustellen waren, so ergaben sich ziemlich bedeutende Drahtlängen, deren Einfluß bei der Messung möglichst ausgeschaltet werden mußte.

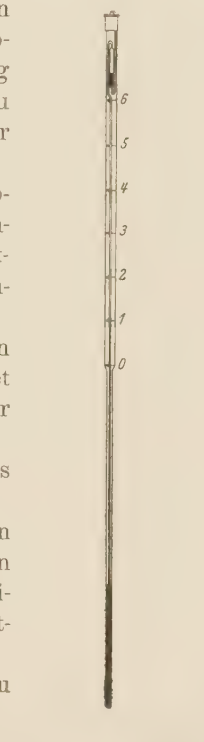


Fig. 9.
Beckmann-Thermometer.

Die erste Forderung ist bei Widerstandsthermometern von selbst erfüllt; sie kann auch bei Thermoelementen erreicht werden, wenn man die Lötstelle künstlich auf geeignete Weise vergrößert.

Dagegen sprechen die beiden anderen Punkte sehr zu gunsten der Widerstandsthermometer.

Erstens genügt es, bei diesen als Kontrolle lediglich den Nullpunkt und Wassersiedepunkt zu untersuchen, was sehr rasch und einfach geschieht. Nach sehr genauen Versuchen von Callendar und Griffit ändert sich die sogenannte Metallkonstante einer Platinsorte nicht, es genügt also einmal dieselbe bestimmt zu haben (siehe Seite 31).

Zweitens können die Zuführungsdrähte, falls eine geeignete Schaltung angewendet wird, bei der Demontierung des Apparates ohne Beeinflussung des Widerstandes durchschnitten und später wieder verlötet werden, während dies bei Thermoelementen immerhin von Einfluß sein kann.

Trotzdem wurde, da dies auf einfache Weise geschehen konnte und Thermoelemente rascher herzustellen sind als Widerstandsthermometer, eine Versuchsreihe mit Kupferkonstantanelementen vorgenommen und zwar, wie von Kester [1]),

[1]) Kester, Phys. Zeitschrift, 6. Jahrgang S. 44 bis 50, 1905.

nach dem Ausschlagverfahren. Es wurde demnach die Temperaturdifferenz zwischen Bad und Hochdruckseite sowie zwischen Hochdruck- und Niederdruckseite gemessen.

Im vorliegenden Fall kam es lediglich auf eine Relativmessung an, bei der eine Eichung nicht notwendig ist. Es sollte die Abhängigkeit vom Druck festgestellt werden und außerdem, ob tatsächlich eine symmetrische Ausgestaltung der beiden Seiten des Apparates mit Isolatoren vor und hinter der Drosselstelle in bezug auf Temperaturänderungen des Bades weniger Störungen verursacht.

Die zweite und dritte Forderung jedoch führte dann doch dazu, die Widerstandsthermometer als definitive Meßinstrumente anzunehmen.

Dieselben wurden nach Angabe der Physikalisch-technischen Reichsanstalt in Charlottenburg in der Werkstatt des Laboratoriums hergestellt (siehe Fig. 8). Chemisch reiner Platindraht von 0,1 mm Dmr., bei Heräus in Hanau bezogen, ist bifilar mit je zwei Zuführungsdrähten an den beiden Enden auf ein Glimmerkreuz aufgewickelt. Die Drähte für die Stromzuführung und diejenigen für die Spannungsmessung, die somit unmittelbar an der Widerstandspule stattfindet, sind aus Kupfer 0,5 mm stark.

Das Glimmerkreuz steckt in einem Glasrohr, das oben und unten mit Löchern versehen ist, so daß die strömende Luft mit dem Platindrahte in Berührung kommt. Auf diese Weise ist auch das Glas vom Druck entlastet. Die Gläser sind in die Stahlfassungen T_1 und T_2 eingekittet. Die Zuführungsdrähte werden durch Packungen von Asbestscheiben in Stopfbüchsen p aus dem Apparat herausgeführt, in den Bohrungen sind sie vom Stahl durch Glasröhrchen isoliert.

Um eine sehr genaue Temperaturmessung der Differenz zwischen der Luft auf Hochdruck- und Niederdruckseite zu erhalten, genügt es nicht, dieselbe rechnerisch als Differenz der beiden für sich gemessenen Temperaturen zu bekommen, sondern diese Differenz ist auch experimentell zu bestimmen. Dies geschieht bei zwei Widerstandsthermometern derart, daß man nicht nur jedes Thermometer für sich mit einem Normalwiderstand vergleicht, der mit Hülfe von parallel geschalteten Zusatzwiderständen genau abgeglichen wird, sondern daß außerdem (Differenzschaltung) wieder die beiden Thermometer unter sich ebenfalls verglichen werden, wobei auch in diesem Falle zu jedem Thermometer ein variabler Widerstand parallel geschaltet ist.

Bei der Wahl der Schaltungsmethoden erwies sich diejenige des übergreifenden Nebenschlusses von Kohlrausch[1]) als die für diesen Fall geeignetste; genau beschrieben ist diese Methode von Jäger[2]).

In Fig. 10 ist die Schaltungsanordnung gezeichnet und zwar die schematische Anordnung der Methode, die ein Differentialgalvanometer benutzt. Die beiden Widerstände W_1 und W_2 sind einander gleich, wenn die Verlegung der Stromquelle E aus dem Zweig $1'\,4'$ in den Zweig $2'\,3'$ keine Aenderung im Ausschlag des Differentialgalvanometers bewirkt. Um die Verlegung von E zu erreichen, wird der sechsnäpfige Umschalter verwendet, einmal in der ausgezogenen Schaltung und einmal in der punktierten.

Die beiden Spulen des Differentialgalvanometers brauchen nicht wirkungsgleich zu sein, der Einfluß der Zuleitungsdrähte von W_1 und W_2 zum Umschalter ist in dieser Anordnung ganz ausgeschaltet.

[1]) F. Kohlrausch, Wied. Annalen 1883, 20, S. 76,

[2]) Jäger, Zeitschrift für Instrumentenkunde 1904 S. 288.

In Fig. 11 ist die angewendete Anordnung gezeichnet. E ist die Stromquelle mit der Spannung etwa 2 V, als Vorschaltwiderstand dient der Rheostat P, derselbe wird je nach der gewünschten Empfindlichkeit verändert; z. B. konnte die Temperaturdifferenz der Hoch- und Niederdruckseite bei der Differenzschaltung bei Einschaltung von $P = 500\,\Omega$ bis auf $0{,}001^0$ bestimmt werden. Die Galvanometerspulen sind in Fig. 11 nicht gezeichnet, sondern die Zuleitungsdrähte 1 und 2 sowie 3 und 4 führen zu je einer Wicklung wie in Fig. 10.

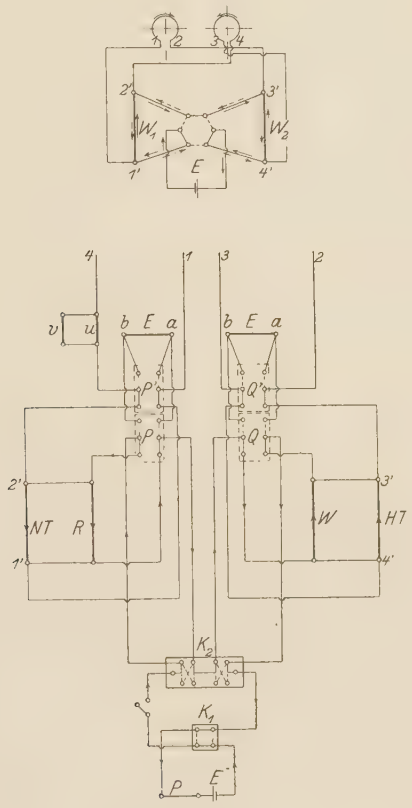


Fig. 10 und 11.

Um die Größe des Ausschlages des Galvanometers zu regulieren, ist in Leitung 4 ein Ballastwiderstand U und ein dazu paralleler Regulierwiderstand V eingeschaltet.

NT ist die Widerstandspule auf Niederdruckseite, dazu parallel geschaltet ein Regulierwiderstand R.

Analog ist HT die Widerstandspule auf Hochdruckseite und dazu parallel der Kurbelrheostat W.

Die mit 1', 2', 3' und 4' bezeichneten Punkte entsprechen denjenigen in Fig. 10. NT nimmt also die Stellung von W_1 ein und HT diejenige von W_2.

K_1 ist ein gewöhnlicher Stromwender, K_2 vertritt die Stelle des sechsnäpfigen Kommutators in Fig. 10, er hat 10 Näpfe, dafür bietet er die Möglichkeit schneller zu beobachten. Es braucht nur eine Wippe umgelegt zu werden; diese Form ist zuerst von Dr. v. Steinwehr[1]) angegeben worden. Zwischen beiden Kommutatoren befindet sich ein Momenteinschalter, der auch dauernd durch Festklemmen den Kontakt herstellen kann.

[1]) Jäger, Zeitschrift für Instrumentenkunde 1904 und 1906.

Außerdem sind noch weitere Umschalter notwendig, um rasch jedes Thermometer für sich untersuchen und beide miteinander vergleichen zu können, dazu dienen P und P' sowie Q und Q', die je miteinander gekuppelt sind.

Beide Kommutatorpaare P, Q; P', Q' geben in der gezeichneten Stellung die Schaltung für den Vergleich der beiden Thermometer miteinander.

Wird ein Paar in die gestrichelte Lage umgelegt, während das andere in der ausgezeichneten Stellung bleibt, so ist das eine Widerstandsthermometer ausgeschaltet und an dessen Stelle der Widerstand E als Vergleichswiderstand eingeschaltet (im Schema ist E doppelt gezeichnet, um die Schaltung nicht zu verwirren). Befinden sich beide Umschalterpaare in der gestrichelten Lage, so sind die beiden Galvanometerspulen kurz geschlossen.

Wie aus der Figur ersichtlich, ist in dieser Schaltung die Wirkung der Verbindungsdrähte der Widerstandsthermometer nebst der Nebenschlüsse R und W mit den Umschaltern P, Q; P', Q' nicht ganz ausgeschaltet. Da aber die Schaltung ganz symmetrisch ist und die Nebenschlüsse R und W sehr groß, so kann man durch Eichen der Thermometer in dieser Schaltung den Fehler unmerklich machen. Sollten die Verbindungswiderstände gänzlich ausgeschaltet werden, so müssen die Widerstandsthermometer mit je sechs Zuführungsdrähten verbunden werden, deren je zwei zu den parallel geschalteten Nebenschlüssen führen.

Der Strom wurde nur sehr kurze Zeit eingeschaltet, solange die Ablesung stattfand, im Beharrungszustand etwa 2 Minuten.

2 A) Durchführung der Versuche mit Luft.

1) Versuche mit Beckmann-Thermometern.

Bei der Inbetriebsetzung für einen Versuch ist zu unterscheiden zwischen Versuchen mit höherem Druck als 1 at auf Niederdruckseite und solchen für hohen Druck.

Im ersten Fall läßt man aus dem Apparat die Luft unmittelbar in die Atmosphäre strömen, die Verbindung V_{III} mit der Niederdruckseite wird gelöst und das Verbindungsventil V_{IV} derselben mit Zylinder III bleibt geschlossen. Es ist diese Schaltung notwendig, da der mittlere Zylinder das große Luftvolumen nicht ansaugen könnte.

Im zweiten Falle sind vor dem Versuch die Apparate mit Druckluft zu füllen. Dies geschieht entweder dadurch, daß die ganze Anlage auf die gewünschte Höhe aufgepumpt wird, oder, da die Hähne an den Flaschenbatterien eine Aufspeicherung der Luft in großem Maße erlauben, dadurch, daß die in diesen Flaschen von früheren Versuchen her etwa noch vorhandene komprimierte Luft langsam in alle übrigen Teile der Anlage gelassen wird.

Die Einstellung der drei auf Seite 17 beschriebenen Beckmann-Thermometer für den gewählten Temperaturbereich erfolgte auf bekannte Weise durch Abtrennen des überschüssigen Quecksilbers, eine Kontrolle der Einstellungen untereinander im Wasserbad hatte keine Schwierigkeit und fand vor jedem Versuch statt.

Der Versuch an und für sich zerfällt in drei Abteilungen, gleichgültig, welche Temperaturmessung man wählt:

1) Erreichung der gewünschten Druckhöhe und Einstellung der Druckdifferenz.

2) Vorperiode zur Erreichung des Beharrungszustandes.

3) Eigentlicher Versuch.

Je nach der Höhe des Druckes, bei welchem der Versuch stattfinden sollte, sowie nach der Menge der in den Flaschenbatterien im Keller aufgespeicherten Luftmenge, dauerte der erste Abschnitt kürzer oder länger, doch wurde schon bei Beginn desselben das Wasser durch das den Durchströmapparat enthaltende Bad geleitet. Dadurch wurde erreicht, daß der für Temperaturänderungen sehr träge Apparat sicher bei Beginn des Hauptversuches die Badtemperatur angenommen hatte.

Die feine Einregulierung auf den gewünschten absoluten Druck, sowie die Einstellung der Druckdifferenz mit Hülfe des Reguliernadelventiles V_V erfolgte sehr langsam; dadurch werden Luftschwingungen vermieden und das Konstanthalten der Quecksilbersäule mit Hülfe der Ablesungen des Millivoltmeters sehr erleichtert. Da die Versuche bei 6 at Druckdifferenz vorgenommen wurden, so wurde nur der Stand I am Quecksilbergefäß im Keller und der erste Stand über Flur eingeschaltet. Der erstere brauchte nicht immer beobachtet zu werden, sondern es genügte die Beobachtung desselben am Anfang und Ende des Versuches, der letztere mußte jedoch mit großer Sorgfalt dauernd im Auge behalten werden.

Sobald die Druckdifferenz die nötige Beharrung erreicht hatte, was sich am Millivoltmeter durch kleine gleichmäßige Pendelungen[1]) um eine bestimmte Ruhelage zeigte, begann die Vorperiode.

Bei dieser wurde die Vorsorge getroffen, die Thermometer im Bad durch Einregulieren der strömenden Wassermenge möglichst auf gleicher Einstellung zu halten; es war möglich, Einschränkung der Schwankungen auf wenige Hundertstel Grad zu erreichen.

Die Herstellung des Beharrungszustandes dauerte bei niederen Drücken wegen der geringen Luftmasse, welche durch den Apparat hindurchströmte, mehrere Stunden.

Hatte sich während einer halben Stunde eine gleichbleibende Differenz der Beckmann-Thermometereinstellungen auf Hoch- und Niederdruckseite gezeigt, wobei häufige Ablesungen mit der Lupe stattfanden, so konnte der eigentliche Versuch beginnen.

Es wurden nun alle fünf Minuten die Thermometer, Manometer und das Millivoltmeter abgelesen, etwa 1 Stunde lang.

Die Versuche bei niederen Drücken wurden öfter wiederholt, da sie nicht so sichere Resultate bieten, wie die bei hohen Pressungen und dies durch eine größere Anzahl von Beobachtungen ausgeglichen werden sollte.

Aus den beigegebenen Zahlentafeln 1 bis 4 ist die Art der Aufschreibung ersichtlich.

Die Berechnung der Druckdifferenz erfolgt auf nachstehende Weise.

Aus den Ausschlägen des Millivoltmeters wurde bei der Berechnung des Druckes das Mittel aus allen Beobachtungen genommen und danach in der auf Seite 10 beschriebenen U-Röhre die mittlere Eintauchtiefe des Bleistiftes bestimmt. Die beiden Bleistifte in Stand I und II waren, wie bereits oben (siehe Seite 8) erwähnt, gleich lang. Die Höhe der Quecksilbersäule ergibt sich dann aus den folgenden vier Angaben:

1) Entfernung der Marke F_1 am unteren Stand I vom Nullpunkt der Meßlatte = 180,0 mm.

2) Entfernung der Marke F_2 am oberen Stand II vom Nullpunkt der Meßlatte = 4537 mm.

[1]) Die Druckdifferenz und der absolute Druck wurden von einer Hülfskraft mit Hülfe der Ventile V_V und V_{IX} (siehe Seite 16) dauernd geregelt.

3) Mittlere Bleistifteintauchtiefe am Stand I = e_1.

4) Mittlere Bleistifteintauchtiefe am Stand II = e_2.

Als Kontrolle wurde die aus diesen 4 Ablesungen bestimmte Druckdifferenz einmal mit zwei doppeltzeigenden Kontrollmanometern nachgemessen, indem diese auf Hoch- bezw. Niederdruckseite angeschlossen wurden. Die Kontrollmanometer waren in 0,1 at geteilt, so daß 0,01 at geschätzt werden konnten. Die Uebereinstimmung der beiden Meßmethoden war vollkommen.

Die Zahlentafeln 1 bis 4 enthalten in der ersten Kolonne die Zeit der Beobachtungen in der zweiten und dritten die Temperaturen des Bades, am

Zahlentafel 1.

Versuch mit Beckmann-Thermometer bei 21 at Druck auf Niederdruckseite.

Datum: 9. Juni 1908.

Zeit st min	Stand I	Stand II	Bad H. T.	Bad Beckmann 63	H. Dr. Beckmann 67	N. Dr. Beckmann 66	Differenz δ	Bemerkungen
4 20	90,0	87,5	10,80	2,180	2,795	1,370	1,425	Wasserkühlung und Gasflamme zum konstanthalten der Badtemperatur. Düse und Ring aus Hartgummi. Außen- und Innenrohr aus Buchsbaum. Ueberdruck auf Niederdruck 21 bis 22 at.
25		89,5		2,150	2,804	1,355	1,449	
30		82,0	↑	2,152	2,780	1,335	1,445	
35		88,0		2,152	2,819	1,343	1,476	
40		87,0		2,160	2,850	1,357	1,493	
45		84,5		2,169	2,868	1,372	1,496	
50		86,5	Beharrungszustand	2,171	2,860	1,360	1,500	
55		81,0		2,170	2,871	1,367	1,504	
5 —		86,0		2,186	2,890	1,383	1,507	Einstellung der Beckmann-Thermometer.
5		84,5		2,170	2,885	1,388	1,497	$B_{63} = B_{67} + 0{,}644$
10		86,5		2,150	2,805	1,353	1,452	$B_{67} = B_{66} + 0{,}086$
15		82,0		2,163	2,780	1,315	1,465	
20		86,6		2,170	2,796	1,315	1,481	Beharrung von 4 Uhr 30 bis 5 Uhr 35. Gradwert der Beckmann-Thermometer 1,007
25		75,5		2,169	2,800	1,313	1,487	
30		88,5		2,160	2,798	1,312	1,486	
35		89,0	↓	2,150	2,785	1,290	1,495	
Mittel		85,1		2,165	2,835		1,480	
	e_1=50 mm	e_2=20 mm			$\Delta = 0{,}670$			

Berechnung der Druckdifferenz:

$e_2 =$ + 20 mm Hg Stand II
+ 4537 » » } an der Meßlatte
— 180 » » } gemessen
$e_1 =$ — 50 » » Stand I

4327 mm Hg = 5,88 kg/cm²

Berechnung der Lufttemperatur:

auf Hochdruckseite 10,80° Badtemperatur
+ 0,670 = Δ
Beckmann-Einstellung + 0,644
12,114° C.

Berechnung des Effektes
bei 12,1° C und 5,88 kg/cm² Druckdifferenz:

δ Mittel 1,480°
Einstellung −0,086°
1,394° · 1,007

$\delta = 1{,}405°$ C

α pro 1 at 0,239
α » » und 0° C reduziert: 0,261

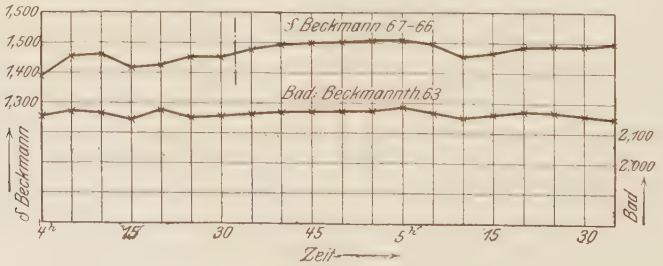


Fig. 12. Versuch vom 9. Juni 1908. Druck HS 27,5 kg/qcm.

Hauptthermometer (HT) und an einem Beckmann-Thermometer (Nr. 63 bezw. 65) abgelesen.

Da mit Hülfe eines Beckmann-Thermometers die Badtemperatur sehr konstant gehalten wurde, so genügte eine einmalige Angabe des Hauptthermometers. Die Ablesungen des Beckmann-Thermometers sind dagegen dauernd gemacht. Zwei Kolonnen enthalten sodann die Ablesungen der Beckmann-Thermometer Nr. 67 auf Hochdruck- und Nr. 66 auf Niederdruckseite und eine dritte die daraus sich ergebende Differenz δ.

Zahlentafel 2.

Versuch mit Beckmann-Thermometern bei 1 at Druck auf Niederdruckseite.

Datum: 20. Juni 1908.

Zeit st min	Stand I	Stand II	Bad H. T.	Bad Beckmann 65	H. Dr. Beckmann 67	N. Dr. Beckmann 66	Differenz δ	Bemerkungen
3 —	88,0	87,0	10,8	4,550	2,215	0,860	1,355	Wasserkühlung und Rührer,
15		84,0		4,560	2,200	0,815	1,385	ohne Zusatzflamme. Düse
30		86,4		4,530	2,168	0,753	1,415	und Ring aus Hartgummi.
45		86,5		4,556	2,162	0,731	1,431	
4 —		88,5		4,546	2,157	0,716	1,441	Einstellung der Beckmann-Thermometer.
15		85,0		4,550	2,150	0,690	1,460	
30		91,0		4,565	2,140	0,665	1,475	$B_{65} = B_{67} + 2{,}715$
45		90,0		4,578	2,140	0,650	1,490	$B_{67} = B_{66} + 0{,}090$
5 —	91,0	90,0	Beharrungszustand	4,563	2,130	0,630	1,500	Kontrollmanometer auf:
15		88,5		4,570	2,100	0,615	1,494	Hochdr.-Seite: 6 at
30		91,0		4,600	2,100	0,600	1,500	Niederdr.-Seite: 42 mm Hg
45		91,0		4,615	2,100	0,590	1,510	Gradwert der Beckmann-Thermometer: 1,007
6 —		94,0		4,620	2,100	0,580	1,520	
15		90,0		4,630	2,100	0,580	1,520	
30		91,0		4,640	2,100	0,580	1,520	
45		91,0		4,648	2,101	0,580	1,520	
7 —		92,0		4,666	2,105	0,580	1,525	
Mittel		91,0		4,594	2,106		1,500	
	e_1=45 mm	e_2=64 mm			t = 2,488			

Berechnung der Druckdifferenz:

e_2 = + 64 mm Hg Stand II
+4537 » » } an der Meßlatte
— 180 » » } gemessen
e_1 = — 45 » » Stand I

4376 mm Hg = 5,95 kg/cm²

Berechnung der Lufttemperatur:

auf Hochdruckseite 10,8° Badtemperatur
— 2,49 = Δ
Beckmann-Einstellung + 2,72
11,0° C

Berechnung des Effektes
bei 11,0° C und 5,95 kg/cm² Druckdifferenz:

δ Mittel 1,500°
Einstellung —0,090°
1,410° · 1,007

δ = 1,420°

α pro 1 at 0,239
α » 1 at und 0° C reduziert: 0,258

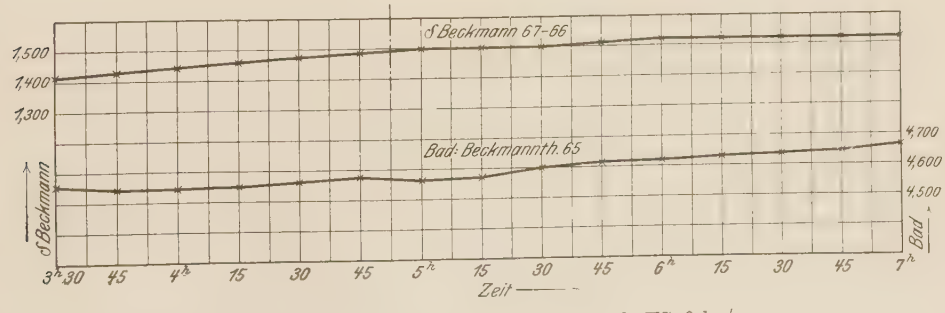


Fig. 13. Versuch vom 20. Juni 1908. Druck HS 6 kg/qcm.

Da nicht zu vermeiden war, daß auch bei sinkender Temperatur abgelesen werden mußte, so wurden die Thermometer jedesmal sanft geklopft.

Die letzte Kolonne enthält einige Betriebsangaben, sowie den Vergleich der Ablesungen B_{63}, B_{67}, B_{66} der drei Beckmann-Thermometer bei gleicher Temperatur.

Am unteren Ende der Zahlentafeln sind außer einigen Mittelwerten noch die Werte von e_1 und e_2 eingetragen, die, in mm gemessen, den Ablesungen am Millivoltmeter bei der elektrischen Druckmessung entsprechen.

Zahlentafel 3.

Versuch mit Beckmann-Thermometern bei 1 at auf Niederdruckseite.

Datum: 22. Juni 1908.

Zeit st	min	Stand I	Stand II	Bad H. T.	Bad Beckmann 65	H. Dr. Beckmann 67	N. Dr. Beckmann 66	Differenz δ	Bemerkungen
1	—	88	92	10,95	4,730	2,200	0,770	1,430	Verhältnisse wie am 20. Juni,
2	30		88		4,750	2,300	0,745	1,555	nur wurde das Thermometer
	45		90		4,760	2,278	0,710	1,568	auf Niederdruckseite ohne
3	—		90		4,739	2,255	0,702	1,553	Thermometerrohr eingesetzt.
	15		89		4,740	2,240	0,685	1,555	
	30		90		4,721	2,213	0,651	1,562	Einstellung der Beckmann-Thermometer.
	45		92	Beharrungszustand	4,702	2,180	0,623	1,557	
4	—		91		4,708	2,160	0,610	1,550	$B_{65} = B_{67} + 2{,}710$
	15		89		4,710	2,150	0,598	1,552	$B_{67} = B_{66} + 0{,}090$
	30		89		4,710	2,148	0,592	1,556	Kontrollmanometer auf:
	45		90		4,715	2,145	0,584	1,561	Hochdr.-Seite: 6 at
5	—		91		4,714	2,145	0,565	1,580	Niederdr.-Seite: 34 mm Hg
	15		93		4,721	2,145	0,560	1,585	Gradwert der Beckmann-Thermometer 1,007
	30		88,5		4,740	2,145	0,560	1,585	
	45		90,0		4,755	2,155	0,560	1,595	
Mittel			91		4,709	2.157		1,553	
		e_1=45 mm	e_2=63 mm		$\Delta = -2{,}552$				

Berechnung der Druckdifferenz:

$e_1 = +$ 63 mm Hg Stand II
+4537 » » } an der Meßlatte
— 180 » » } gemessen
$e_2 = -$ 45 » » Stand I

4375 mm Hg = 5,94 kg/cm²

Berechnung der Lufttemperatur:

auf Hochdruckseite 10,95° C Badtemperatur
— 2,55 = Δ
Beckmann-Einstellung + 2,71
11,1° C

Berechnung des Effektes
bei 11,1° C und 5,94 kg/cm² Druckdifferenz:

δ Mittel 1,553°
Einstellung —0,090°
1,463° · 1,007
$\delta = 1{,}472°$

α pro 1 at 0,248
α » 1 at und 0° C reduziert: 0,269

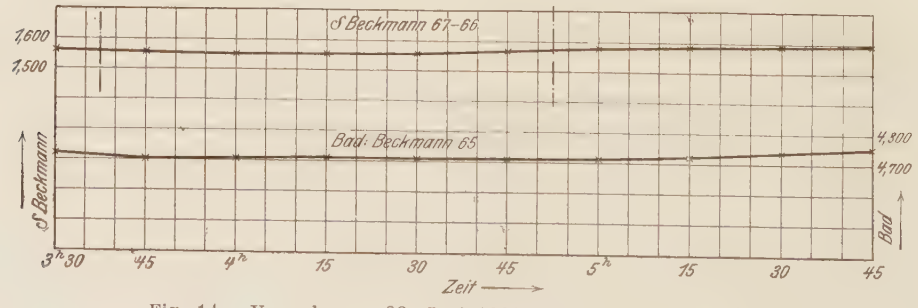


Fig. 14. Versuch vom 22. Juni 1908. Druck HS 6,00 kg/qcm.

Die Auswertung der Versuchsdaten bietet keinerlei Schwierigkeiten, es muß lediglich die Einstellung der Thermometer und deren Gradwert berücksichtigt werden.

Die Temperatur der durch die Drosselstelle strömenden Luft war nicht immer genau die gleiche wie die Badtemperatur, sie ergibt sich unter gleichzeitiger Benutzung der Ablesungen der beiden im Bade befindlichen Thermometer und des Beckmann-Thermometers auf Hochdruckseite.

Zahlentafel 4.

Versuch mit Beckmann-Thermometern bei 100 at auf Niederdruckseite.

Datum: 31. Juli 1908.

Zeit st	min	Stand I	Stand II	Bad H. T.	Bad Beckmann 65	H. Dr. Beckmann 67	N. Dr. Beckmann 66	Differenz δ	Bemerkungen
9	40	77,5	52	13,4	2,265	2,160	1,128	1,032	Düse aus Holz, Pfropfen aus
	45		59		2,255	2,165	1,130	1,035	Asbest, laufendes Wasser mit
	50		52		2,272	2,165	1,125	1,040	Rührer.
	55		64		2,258	2,170	1,126	1,044	
10	—		65		2,253	2,164	1,116	1,048	Einstellung der Beckmann-Thermometer.
	5		62		2,260	2,163	1,115	1,048	
	10		65		2,252	2,160	1,110	1,050	$B_{65} = B_{67} + 0{,}091$
	15		60		2,228	2,152	1,100	1,052	$B_{67} = B_{66} + 0{,}056$
	20		63		2,260	2,177	1,115	1,062	Manometer auf Hochdruck-
	25		59		2,268	2,170	1,115	1,055	seite 106 bis 103 at. Grad-
	30		62		2,232	2,155	1,093	1,062	wert der Beckmann-Ther-
	35		61	↑	2,268	2,154	1,080	1,074	mometer 1,003
	40		65	Beharrungszustand	2,230	2,155	1,080	1,075	
	45		64		2,254	2,143	1,061	1,082	
	50		61		2,242	2,160	1,075	1,085	
	55		60		2 243	2,154	1,076	1,078	
11	—		61		2,251	2,160	1,082	1,078	
	5		60		2,272	2,168	1,088	1,080	
	10		61	↓	2,236	2,163	1,093	1,070	
Mittel			61		2,250	2,157		1,077	
		e_1=10 mm	e_2=70 mm			$\Delta = 0{,}093$			

Berechnung der Druckdifferenz:

$e_2 = +$ 70 mm Hg Stand II
+ 4537 » » } an der Meßlatte
— 180 » » } gemessen
$e_1 = -$ 10 » » Stand I

4417 mm Hg = 6,01 kg/cm²

Berechnung der Lufttemperatur:

auf Hochdruckseite 13,4° C im Bad
— 0,093 = Δ
Beckmann-Einstellung + 0,091
13,4° C

Berechnung des Effektes
bei 13,4° C und 6,01 kg/cm² Druckdifferenz:

δ Mittel 1,077°
Einstellung − 0,056°

$\delta = 1{,}021°$

" pro 1 at = 0,170
α » 1 at auf 0° C reduziert: 0,187

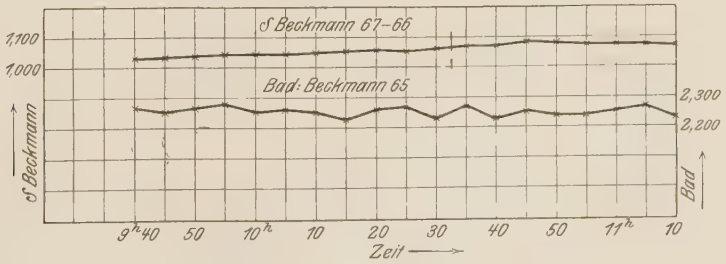


Fig. 15. Versuch vom 31. Juli 1908. Druck HS 105 kg/qcm.

Am Fuße der Zahlentafeln findet sich die Berechnungsart für die Druckdifferenz, die Lufttemperatur auf Hochdruckseite und den Kühleffekt.

Diese Versuche sind graphisch Seite 22 bis 25 aufgetragen, um die Schwankungen der Badtemperatur und des Effektes δ vor Augen zu führen. Eine Zusammenstellung der wesentlichen Daten der Versuche findet sich in Zahlentafel 5.

Versuchsergebnisse bei Anwendung von Beckmann-Thermometern.

Es war nicht möglich, die Versuche immer bei genau gleicher Temperatur der strömenden Luft vorzunehmen; um die bei verschiedenen Temperaturen beobachteten Kühleffekte miteinander vergleichbar zu machen, ist es zweck-

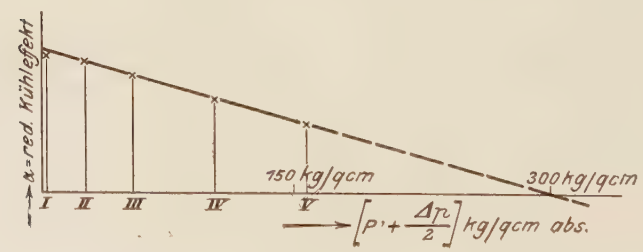
Zahlentafel 5.

Versuche mit Beckmann-Thermometern.

1	2	3	4	5	6	7	8
Datum 1908	Luft-temperatur ^{0}C	Ueber Druck P' auf N. S.	Druck-differenz Δp kg/cm^2	Kühl-effekt Δt ^{0}C	Kühl-effekt pro kg/cm^2	α reduz. Kühleffekt 0^0 C und 1 at	Mittel
1. Juni	11,8	103 mm Hg	5,95	1,850	0,311	0,336	
13. Juni	11,2	42 » »	5,93	1,330	0,224	0,242	
15. Juni	11,0	37 » »	5,92	1,380	0,233	0,251	0,268 I
20. Juni	11,0	42 » »	5,95	1,420	0,239	0,257	
22. Juni	11,1	34 » »	5,94	1,472	0,248	0,267	
23. Juni	11,1	115 » »	5,94	1,402	0,236	0,255	
9. Juni	12,1	21,5 kg/cm^2	5,88	1,405	0,239	0,260	0,260 II
3. Juni	11,3	50 »	5,90	1,272	0,216	0,233	0,232 III
5. Aug.	13,3	50 »	6,05	1,273	0,211	0,231	
31. Juli	13,4	98 »	6,01	1,024	0,170	0,187	0,187 IV
10. Aug.	12,9	152 »	6,07	0,750	0,124	0,135	0,135 V
10. Aug.	12,9	153 »	6,03	0,742	0,123	0,135	

Zahlentafel 6. Zusammenstellung.

1	2	3	4	5	6
Nr.	Mittlere Temperatur ^{0}C	arithmetisches Mittel aus dem Druck auf Hoch- und Niederdruckseite kg/cm^2	Druck-differenz Δp kg/cm^2	α beobachtet	α berechnet
I	10,4	4,06	5,95	0,268	0,279
II	11,4	25,4	5,88	0,260	0,259
III	11,7	54,0	6,00	0,232	0,233
IV	12,9	102,0	6,01	0,187	0,188
V	12,5	156,0	6,05	0,135	0,137



mäßig, dieselben auf 0° C zu reduzieren für 1 kg/cm² Druckdifferenz nach der Thomson-Jouleschen Formel

$$dT = \alpha \left(\frac{273}{T}\right)^2 dp.$$

Wenn diese Formel auch keine strenge Gültigkeit für weite Druck- und Temperaturbereiche hat, so darf sie doch zur Ausführung dieser Reduktion benutzt werden.

Die Resultate sind in Zahlentafel 6 numerisch angegeben und in der darunter befindlichen Figur graphisch aufgetragen. Man ersieht daraus, daß die in der Thomson-Jouleschen Formel eingeführte Größe α, welche den auf 0° C und 1 at Druckunterschied reduzierten Kühleffekt darstellt, keine Konstante ist, sondern eine Funktion des Druckes, welche mit zunehmendem Druck abnimmt.

Trägt man das arithmetische Mittel aus dem absoluten Druck auf Hochdruck- und auf Niederdruckseite als Abszisse, den Wert von α als Ordinate auf, so liefert diese graphische Darstellung innerhalb des beobachteten Druckbereiches sehr genau eine lineare Abhängigkeit der α von p, nämlich:

$$\alpha = 0{,}280 - 0{,}000932\, p.$$

In Zahlentafel 6 sind in der letzten Kolonne zum Vergleich die nach dieser Formel berechneten Werte für α eingetragen.

Die Abweichungen sind nur gering und betragen im Höchstfalle etwa 3,5 vH beim kleinsten Druck. Es ist aber den Versuchen bei niederen Drücken eine geringere Genauigkeit zuzuschreiben als den bei höheren Drücken.

2) Versuche mit Thermoelementen.

Diese Versuche wurden zwischen denen mit Beckmann- und Widerstandsthermometern eingeschaltet, um auf einfache und rasche Weise den Einfluß der symmetrischen Isolierung des zweiten Apparates auf Hoch- und Niederdruckseite kennen zu lernen. Es genügte dabei eine Relativmessung, daher wurden nur die Ausschläge der Thermokräfte an einem Spiegelgalvanometer gemessen in Skalenteilen abhängig vom Druck miteinander verglichen.

Eine Lötstelle eines Kupfer-Konstantanelementes war in die Hochdruckseite des Durchströmapparates montiert, die andere in die Niederdruckseite, die Kupferdrähte gingen zu einem Umschalter und von da zu einem Galvanometer. Die Ausschläge des Galvanometers wurden mit Hülfe eines Fernrohres an einer Skala mit mm-Teilung abgelesen. Um die Temperatur der strömenden Luft auf Hochdruckseite angenähert zu kennen, wurde eine dritte Kupfer-Konstantanlötstelle ins Wasserbad eingetaucht, der Konstantandraht derselben wurde mit dem Konstantandraht des oben genannten Thermoelementes verlötet, der Kupferdraht führte ebenfalls zum Umschalter. Durch diese Anordnung ist es möglich, die Thermokraft des Kupfer-Konstantanelementes in der Hochdruckseite des Apparates und des Wasserbades ebenfalls durch einen Ausschlag am Galvanometer zu messen. Diese Anordnung wurde derjenigen von Kester[1]) nachgebildet.

Die Kupfer- und die Konstantandrähte von 0,5 mm Dicke wurden aus den Apparat durch Stopfbüchsen mit Asbestscheiben als Dichtungsmittel geführt. Diese Scheiben waren straff über die Drähte gezogen und wurden durch Schrauben fest aufeinander gepreßt, diese Dichtung erwies sich als vollkommen,

[1]) Kester, l. c.

Da ein Thermoelement, wie das gewöhnlich gewünscht wird, nur die Temperatur in einem Punkte mißt, während im vorliegenden Falle die Messung über eine ausgedehntere Stelle verlangt wurde, so wurde die Lötstelle künstlich vergrößert mit Hülfe eines Kupferrohres. Sowohl auf Hochdruck- als auf Niederdruckseite befand sich ein solches Rohr von 5 cm Länge, der Durchmesser betrug 8 mm, die Wandstärke 0,5 mm. An einem Ende war es geschlossen und dort war die Lötstelle des Konstantandrahtes mit dem Kupferdraht angelötet, der Konstantandraht wurde der Länge nach durch das Rohr, der Kupferdraht außen entlang geführt. Das Kupferrohr sorgt dann infolge seiner guten Leitfähigkeit dafür, daß ein Temperaturausgleich mit den anderen Stellen der Meßregion stattfindet.

Die Anordnung des Drosselpfropfens, sowie die Isolierung (Hartgummi) ist die gleiche wie beim Apparat II, Seite 15.

Durchführung der Versuche mit Thermoelementen.

Die Einstellung der Druckdifferenz war natürlich die gleiche wie bei den Versuchen mit Beckmann-Thermometern. Auch in diesem Falle wurde auf lange Beobachtung der Vor- und Versuchsperiode Wert gelegt. Es zeigte sich, daß bei dieser neu gewählten Anordnung die Badtemperatur nicht mehr ganz konstant gehalten werden mußte, da die Temperaturschwankungen des Bades sich wegen der gleichen Isolierung auf Hoch- und Niederdruckseite mit gleicher Geschwindigkeit auf beiden Seiten der Drosselstelle bemerkbar machten. Da außerdem der Beharrungszustand leicht daraus erkannt wurde, daß sich der Galvanometerausschlag nicht änderte, so waren die Beobachtungen sehr einfach und wenig anstrengend. Es konnten daher Versuche mit verschiedenen Drücken rasch hintereinander vorgenommen werden

Die Zahlentafeln 7 bis 8 bieten zwei Beispiele für die Art der Aufschreibung.

In der ersten Kolonne ist die Zeitangabe eingetragen. In der zweiten stehen die Ausschläge des Millivoltmeters bei Einschaltung des Stand II des Differentialmanometers zur Berechnung des Druckunterschiedes, analog wie das bei den Versuchen mit Beckmann-Thermometern der Fall war.

In der dritten Kolonne sind die Angaben eines in $^1/_5{}^0$ geteilten Quecksilberthermometers eingetragen, welche die Badtemperatur betreffen.

Kolonne 4 gibt die Ausschläge des Galvanometers an, welche durch das Thermoelement Hochdruckseite-Bad hervorgerufen werden. Die Ausschläge sind in Skalenteilen eingetragen.

Kolonne 5 enthält analog die Ausschläge des Thermoelementes Hochdruckseite-Niederdruckseite, ebenfalls in Skalenteilen.

Kolonne 6 enthält die Angaben des Manometers auf Hochdruckseite.

Kolonne 7 enthält die Ruhelage des Galvanometers auf der Skala.

Zur Ermittlung der Temperaturdifferenz zwischen Luft auf Hochdruckseite und Bad ist die Differenz der Mittelwerte der Kolonne 4 und 7 maßgebend. Diese ist so gering, daß die Lufttemperatur gleich der Badtemperatur gesetzt werden kann. Ebenso berechnet sich der Kühleffekt als Ausschlag durch die Differenz der Mittelwerte der Kolonnen 5 und 7. Dieser Ausschlag, gemessen in Skalenteilen, wird dann wie bei den Versuchen mit Beckmann-Thermometern auf 0° C und 1 at Druckdifferenz reduziert.

Zahlentafel 7. Versuche mit Thermoelementen.

Datum: 28. Oktober 1908. Druck 1,6 at NS.

Zeit st	min	Stand II	Badtemperatur H. T. °C	Thermoelement Bad/HS	Thermoelement HS/NS	Manometer H. S.	Ruhelage Galvanometer	Bemerkungen
10	15	96,0	14,95	53,40	39,72	6,60	52,80	Isolierung: 2 Hartgummirohre je auf Hoch- und Niederdruckseite. Asbestpropfen, Thermoelemente, Kupferkonstanten mit Kupferrohrvergrößerung. Stand I: 91,0.
	20	95,5	15,00	53,39	39,62	6,65	52,82	
	25	95,5	15,05	53,39	39,50	6,60	52,80	
	30	95,5	15,10	53,25	39,50	6,65	52,81	
	35	95,0	15,15	53,25	39,50	6,60	52,82	
	40	95,5	15,20	53,29	39,70	6,60	52,95	
	45	95,5	15,25	53,30	39,70	6,60	53,00	
	50	95,5	15,30	53,29	39,60	6,60	53,00	
	55	95,0	15,30	53,20	39,60	6,60	52,95	
12	—	95,0	15,35	53,10	39,80	6,60	52,90	
	5	95,5	15,40	53,09	39,70	6,60	52,90	
	10	95,0	15,40	53,10	39,75	3,61	52,90	
	15	95,5	15,40	53,11	39,81	6,61	52,95	
Mittel		95,4	15,18	53,24	39,65	6,60	52,90	

Aus Stand I und Stand II: Druckdifferenz 6,01 kg/cm².

Resultierender Ausschlag für Thermoelement Bad/H. S.:

Ruhelage . . . . 52,90 Skalenteile
mittlerer Ausschlag . . . . 53,24 »
resultierender Ausschlag . . . . 0,34 Skalenteile

Resultierender Ausschlag für Thermoelement HS/NS (Kühleffekt):

Ruhelage . . . . 52,90 Skalenteile
mittlerer Ausschlag . . . . 39,65 »
bei 15,2° und 6,01 kg/cm² Differenz 13,25 Skalenteile (Kühleffekt)
auf 0° » 1 » » 2,467 » »

Zahlentafel 8. Versuche mit Thermoelementen.

Datum: 29. Oktober 1908. Druck: 151 at N. S.

Zeit st	min	Stand II	Badtemperatur H. T. °C	Thermoelement Bad/HS	Thermoelement HS/NS	Manometer H. S.	Ruhelage Galvanometer	Bemerkungen Versuch Nr. 4
3	30	95,0	16,55	45,90	37,80	156	45,56	Stand I 72,0 Sonstige Verhältnisse wie bei Versuch 1 vom 28. Oktober 1908
	35	94,5	16,60	46,00	38,00	156	45,60	
	40	95,4	16,60	45,90	38,00	156	45,60	
	45	94,0	16,62	45,70	37,95	156	45,60	
	50	98,5	16,65	46,00	37,90	156	45,62	
	55	97,5	16,70	45,75	37,90	156	45,63	
4	—	100,0	16,72	45,75	38,20	156	45,65	
	5	96,0	16,75	45,70	37,95	156	45,63	
	10	94,5	16,80	45,80	38,10	156	45,65	
	15	94,5	16,82	45,90	38,20	156	45,67	
	20	94,0	16,85	45,70	38,00	155	45,65	
	25	97,0	16,90	45,75	38,00	156	45,68	
	30	94,5	16,95	45,72	38,00	156	45,66	
Mittel		96,0	16,75	45,81	38,00	156	45,63	

Aus Stand I und Stand II: Druckdifferenz 6,01 kg/cm².

Resultierender Ausschlag für Thermoelement Bad/HS:

Ruhelage . . . . 45,63 Skalenteile
mittlerer Ausschlag . . . . 45,81 »
resultierender Ausschlag . . . . 0,18 Skalenteile

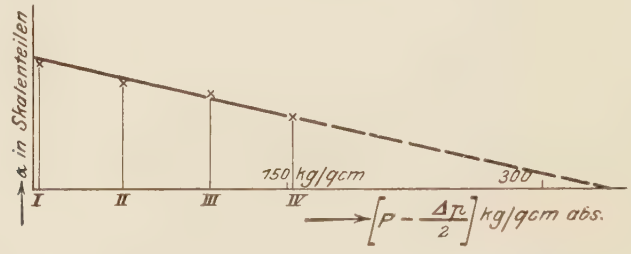
Resultierender Ausschlag für Thermoelement HS/NS (Kühleffekt):

Ruhelage . . . . 45,63 Skalenteile
mittlerer Ausschlag . . . . 38,00 »
bei 16,8° C und 6,01 kg/cm² Ausschlag 7,63 Skalenteile (Kühleffekt)
auf 0° C » 1 » » 1,127 » »

Zahlentafel 9.

Zusammenstellung der Versuche mit Thermoelementen.

Versuch	I	II	III	IV	Bemerkungen
Badtemperatur . . . °C	15,18	16,18	15,79	16,75	
Druck P . . . . kg/cm²	6,60	56,0	106,0	156,0	auf Hochdruckseite
Druckdifferenz	6,01	6,01	6,01	6,01	kg/cm²
Ruhelage Galvanometer . .	52,90	53,10	54,80	45,68	in Skalenteilen
Ausschlag für Bad/H. S. . .	53,24	52,91	54,93	45,81	» »
Result. Ausschlag Bad/H. S. .	+ 0,34	— 0,19	+ 0,13	+ 0,18	» »
Ausschlag für H. S./N. S. . .	39,65	40,53	44,78	38,00	» »
Result. Kühleffekt	13.25	12,57	10,02	7,63	» »
α = reduz. Kühleffekt . . .	2,467	2,119	1,862	1,127	» »



Versuchsergebnisse bei Anwendung von Thermoelementen.

Trägt man die Ausschläge des Galvanometers auf 0° C Badtemperatur und pro 1 at Druckdifferenz reduziert, welche ein Maß für den Kühleffekt bilden, graphisch auf, so findet man auch hier als Abhängigkeit eine gerade Linie, siehe Fig. unter Zahlentafel 9. Der Kühleffekt nimmt mit wachsendem Drucke linear ab und eine Nullwirkung würde bei Extrapolation bei etwa 350 at eintreten.

Für die weitere Durchführung der Versuche war das Resultat wertvoll, daß eine geeignete Anordnung der Isolierung die lästigen Schwankungen der Badtemperatur ausschaltet und dadurch ein schnelleres Arbeiten gestattet.

3) Versuche mit Widerstandsthermometern.

Die Eichung der Thermometer war mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Da sich die Platinwiderstandspulen in offenen Glasrohren befinden, welche in schwere Metallfassungen (siehe S. 15, Fig. 8) eingekittet sind, so wäre es nicht möglich, auf einwandfreie Weise den Schwefelsiedepunkt zu bestimmen, da die Fassung zuviel Wärme ableitet.

Es wurden daher auf Anregung der Physikalisch-technischen Reichsanstalt nach Aufwickeln der Spulen auf das Glimmerkreuz, ohne die schwere Metallfassung, in einem geschlossenem Glasrohre die Temperaturkonstanten zur Berechnung der wahren Temperatur für die verwendete Platinsorte bestimmt. Dabei wurden alle Vorsichtsmaßregeln getroffen, wie sie hauptsächlich Callendar[1]) angibt. Das Eis wurde aus destilliertem Wasser hergestellt, ebenso diente der Siedepunkt von destilliertem Wasser als zweiter Fixpunkt. Als dritter Fix-

[1]) Callendar, Philos. Trans. Bd. 182 A 1891.

punkt diente der Schwefelsiedepunkt. Bei allen drei Fixpunkten wurde auf sehr lang dauernde und wiederholte Beobachtung besonderer Wert gelegt.

Nach Anbringung der Fassungen wurden die ersten beiden Fixpunkte nachgeprüft. Die Messungen geschahen, nachdem die Thermometer ausgeglüht, wiederholt auf 500° erhitzt und wieder in Eis gebracht worden waren. Die Messungen ergaben dabei für beide Thermometer, die aus der gleichen Platinsorte gewickelt worden waren, eine gute Uebereinstimmung der sogenannten Platinkonstante (s. u.).

Bezeichnen wir mit

W_t den Platinwiderstand bei t^0 C,
W_{100} » » » 100° C,
W_0 » » » 0° C,

so hat man nach Callendar die Beziehungen:

$$t_{pt} = 100 \frac{W_t - W_0}{W_{100} - W_0} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

und

$$t - t_p = \delta \left\{ \left(\frac{t}{100}\right)^2 - \left(\frac{t}{100}\right) \right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2).$$

Dabei bezeichnet man t_p als die Platintemperatur, ihre Abweichung von der wahren Temperatur t wird durch die zweite der beiden Gleichungen angegeben und ist wie ersichtlich von der Größe δ der sogenannten »Platinkonstante« abhängig. Der Wert von δ ist für jede Platinsorte verschieden, aber unveränderlich. Bei den verwendeten Thermometern ergab das eine Thermometer für $\delta = 1{,}537$, das andere $\delta = 1{,}538$. Wir können also für beide den gemeinsamen Wert $1{,}5375$ annehmen.

Bezeichnen wir den Widerstandswert auf Hochdruckseite mit:

$H_{t+\Delta t}$ bei $t + \Delta t^0$ C, H_0 bei 0° C, H_{100} bei 100° C,
mit N_t » t^0 C, N_0 » 0° C, N_{100} » 100° C

auf der Niederdruckseite, so erhalten wir auf Hochdruckseite:

$$t_p + \Delta t_p = 100 \frac{H_{t+\Delta t} - H_0}{H_{100} - H_0} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

und auf Niederdruckseite:

$$t_p = 100 \frac{N_t - N_0}{N_{100} - N_0} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4),$$

wobei also Δt_p den Kühleffekt bedeutet, ausgedrückt in der Platintemperatur,

Aus beiden Gleichungen erhalten wir:

$$\Delta t_p = 100 \frac{(H_{t+\Delta t} - N_t) - (H_0 - N_0)}{(H_{100} - H_0)} - \left[1 - \frac{N_{100} - N_0}{H_{100} - H_0}\right] t_p \quad . \quad . \quad . \quad (I).$$

Durch die Eichung bekommen wir die Größen $(H_0 - N_0)$, $(H_{100} - H_0)$, $(N_{100} - N_0)$ und aus der Widerstandsmessung auf Niederdruckseite die Größe t_p.

Um aus Δt_p den wahren Kühleffekt Δt in °C zu berechnen, müssen wir noch die Korrektionsgleichung hinzunehmen:

$$t - t_p = \delta \left\{ \left(\frac{t}{100}\right)^2 - \left(\frac{t}{100}\right) \right\}.$$

Aus derselben bekommen wir durch Differentiation:

$$dt - dt_p = \delta \left\{ \frac{2\,t\,dt}{100^2} - \frac{dt}{100} \right\}$$

und hieraus angenähert:

$$\Delta t = \Delta t_p \left(1 + \frac{\delta}{100}\left(\frac{2t}{100} - 1\right)\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(II)},$$

wobei an Stelle von t in dieser Korrektionsgleichung t_p gesetzt werden kann.

Die Bestimmung des Kühleffektes verlangt also außer der Messung der oben bei Gl. (I) genannten Differenzen der Widerstände $(H_{t+\Delta t} - N_t)$ noch diejenige der Platintemperatur auf Niederdruckseite.

Außerdem wird zweckmäßig als Kontrolle der Kühleffekt als Differenz der beiden für sich gemessenen Temperaturen auf Hoch- und Niederdruckseite bestimmt.

Wie auf Seite 25 angegeben, waren durch Anwendung von nur 4 Zuleitungsdrähten die Zuführungswiderstände nicht ganz ausgeschaltet, es waren daher zwei Eichungen notwendig. Eine zur Berechnung der Temperaturen auf Hochdruck- und Niederdruckseite, eine zweite zur direkten Messung der Temperaturdifferenz.

Aus der ersteren Eichung bekommen wir als Mittel:

für die Hochdruckseite der Widerstandswerte:

$$H_0 = 22{,}4474\,\Omega;\ H_{100} - H_0 = 8{,}7097\,\Omega;$$

für die Niederdruckseite:

$$N_0 = 23{,}5539\,\Omega;\ N_{100} - N_0 = 9{,}1439\,\Omega$$

und somit für die Berechnung der Temperaturen aus den Gl. (1) und (2) auf der Hochdruckseite:

$$\left.\begin{aligned} {}_{h}t_p &= 100\,\frac{H_t - 22{,}4474}{8{,}7097} \\ t - t_p &= 1{,}5375\,\left\{\left(\frac{t}{100}\right)^2 - \frac{t}{100}\right\} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(A)},$$

und auf der Niederdruckseite:

$$\left.\begin{aligned} {}_{n}t_p &= 100\,\frac{N_t - 23{,}5539}{9{,}1439} \\ t - t_p &= 1{,}5375\,\left\{\left(\frac{t}{100}\right)^2 - \frac{t}{100}\right\} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(B)}.$$

Bei der zweiten Eichung bekommen wir für den direkt gemessenen Kühleffekt in der entsprechenden Lage der Umschalter, wobei beide Thermometer miteinander verglichen wurden, unter Berücksichtigung von Gl. (I):

$$\Delta t_p = 11{,}47\,(H_{t+\Delta t} - N_t) + 12{,}49 + 0{,}05\,t_p \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(C)}$$

und nach Einsetzen des Wertes von δ schließlich:

$$\Delta t = \Delta t_p \left(1 + \frac{1{,}5357}{100}\left(\frac{2t}{100} - 1\right)\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(D)}$$

Berechnung der Widerstände der Thermometer aus den Beobachtungen.

Es erübrigt endlich nur noch die Ableitung derjenigen Gleichungen, mit deren Hülfe die in den Formeln (A), (B) und (C) auftretenden Größen $H_{t+\Delta t}$, N_t und $(H_{t+\Delta t} - N_t)$ aus denjenigen Ablesungen berechnet werden, welche die Versuchsanordnung Fig. 11 unmittelbar ergibt.

1) Berechnung der Widerstände auf Hoch- bezw. Niederdruckseite:

Aus der Fig. 10 ist ohne weiteres ersichtlich, daß beim Vergleich des Hochdruckthermometers HT mit dem Vergleichswiderstand E die Beziehung gilt:

$$\frac{1}{H_{t+\Delta t}} + \frac{1}{W} = \frac{1}{E_1},$$

wobei

$H_{t+\Delta t}$ Widerstand des Hochdruckthermometers,
W Widerstand des variablen Widerstandes,
E_1 Widerstand des Vergleichswiderstandes,

ähnlich für die Niederdruckseite:

$$\frac{1}{N_t} + \frac{1}{R} = \frac{1}{E_2}.$$

Mithin:

$$H_{t+\Delta t} = E_1 \frac{W}{W - E_1}$$

und

$$N_t = E_2 \frac{R}{R - E_2}.$$

2) Für die direkte Differenzmessung, wobei die beiden Thermometer miteinander verglichen werden, hat man:

$$\frac{1}{N_t} + \frac{1}{R} = \frac{1}{H_{t+\Delta t}} + \frac{1}{W},$$

daraus:

$$H_{t+\Delta t} - N_t = \frac{H_{t+\Delta t} - N_t (R - W)}{R\,W},$$

damit sind alle zur Berechnung des Kühleffektes und der einzelnen Lufttemperaturen notwendigen Größen bestimmt.

Durchführung der Versuche mit Widerstandsthermometern.

Ebenso wie bei den Versuchen mit Thermoelementen war auch hier eine stetige Regulierung der Badtemperatur nicht notwendig, da die Isolierung mit Hartgummirohren auf beiden Seiten der Drosselstelle symmetrisch eingerichtet war, (siehe auch Fig. 8 Seite 15). Der Beharrungszustand wurde wegen der geringen Trägheit des Apparates sehr schnell erreicht. Wurde der Widerstand R_n, welcher bei Vergleich der beiden Widerstandsthermometer miteinander parallel zum Niederdruckthermometer geschaltet ist, konstant auf 400 Ω gehalten, so zeigte sich der Beharrungszustand des Kühleffektes am Galvanometer dadurch an, daß bei unverändertem Widerstande W_h, welcher dem Hochdruckthermometer parallel geschaltet war, sich der Ausschlag mit der Zeit nicht veränderte.

Bei der Ablesung zur Bestimmung der Einzeltemperaturen auf Hoch- und Niederdruckseite wurden zunächst die Widerstände auf Nieder- bezw. Hochdruckseite so eingestellt, daß beim Umlegen des zehnnäpfigen Kommutators der Galvanometerausschlag sich nicht änderte.

Sodann wurden die beiden Thermometer miteinander verglichen, der zum Niederdruckthermometer parallel geschaltete Widerstand R_Δ wurde dabei konstant auf 400 Ω gestellt, der andere W_Δ wurde in passender Weise verändert, dabei wurden nur ganz geringe Aenderungen zugelassen, siehe Zahlentafel 10 und 11.

Zahlentafel 10.

Versuche mit Luft (Hartgummiisolierung) bei 1 at Druck auf Niederdruckseite gemessen.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zeit st min	E_2	R_n	E_1	W_h	R_Δ	W_Δ	Bad-Temp. ^{0}C	Hg St. I	Hg St. II	Manometer H. S.	Bemerkungen
11 —	23,9	3550	22,9	3300	400	1375	7,00	91,0	100	6,17	Luftmenge 60 ltr in
15		3470		3190		1372	7,00		102	6,17	2 Minuten
25		3470		3190		1374	7,00		100	6,17	Datum: 9. Febr. 09
35		3470		3260		1376	7,00		101	6,17	Druckdifferenz:
45		3500		3240		1372	7,00		101	6,17	5,97 at
55		3500		3240		1370	7,00		102	6,17	
Mittel		3493		3237		1373	7,00	91,0	101	6,17	

Widerstand auf Niederdruckseite: $N_t = E_2 \frac{R_n}{R_n - E_2} = 23{,}9 \frac{3493}{3469{,}1} = 24{,}0647\ \Omega.$

» » Hochdruckseite: $H_{t+\Delta t} = E_1 \frac{W_h}{W_h - E_1} = 22{,}9 \frac{3237}{3214{,}1} = 23{,}0632\ \Omega.$

Differenzmessung: $H_{t+\Delta t} - N_t = \frac{H_{t+\Delta t} N_t (R_\Delta - W_\Delta)}{R_\Delta W_\Delta} = \frac{-24{,}065 \cdot 23{,}063 \cdot 973}{400 \cdot 1373} = -0{,}983\ \Omega.$

Platintemperatur Niederdruckseite: $_nt_p = \frac{24{,}0647 - 23{,}5539}{9{,}1439} 100 = 5{,}59^0;$

» Hochdruckseite: $_nt_p = \frac{23{,}0632 - 22{,}4474}{8{,}7097} 100 = 7{,}08^0;$

Niederdruckseite: wahre Temperatur: $t_n = 5{,}50^0$
Hochdruckseite: » » $t_h = 6{,}98^0$ } $\Delta t = 1{,}48^0$

$\Delta t_p = 11{,}47\ (-0{,}983) + 12{,}49 + 0{,}05 \cdot 5{,}59 = 1{,}49^0$; wahre Temperaturdifferenz: $\Delta t = 1.465^0$

reduzierter Kühleffekt auf 0^0 C und pro 1 kg/cm^2 Druckdifferenz: **0,249**

Zahlentafel 11.

Versuche mit Luft (Hartgummiisolierung) bei 107 at Druck auf Niederdruckseite gemessen.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zeit st min	E_2	R_n	E_1	W_h	R_Δ	W_Δ	Bad Temp. ^{0}C	Hg St. I	Hg St. II	Manometer H. S.	Bemerkungen
11 30	24,0	2930	23,0	3630	400	1549	7,9	88	102	111,5	Datum: 11. Febr. 09
40		2770		3450		1549	8,0		100	112,5	Druckdifferenz:
50		2740		3400		1546	8,0	87,5	98	112,8	5,97 at
12 —		2690		3300		1545	8,0		102,5	112,5	
10		2640		3280		1545	8,05		110,0	112,5	
20		2620		3260		1549	8,05		99,0	112,5	
30		2630		3280		1549	8,05	87,5	98,8	112,5	
Mittel		2717		3371		1547	8,02	87,5	100	112	

Widerstand auf Niederdruckseite: $N_t = 24{,}0 \frac{2717}{2693} = 24{,}2139\ \Omega$

» » Hochdruckseite: $H_{t+\Delta t} = 23{,}0 \frac{3371}{3348} = 23{,}1580\ \Omega$

Differenzmessung: $H_{t+\Delta t} - N_t = \frac{-24{,}21 \cdot 23{,}16 \cdot 1147}{400 \cdot 1547} = -1{,}039\ \Omega$

Platintemperatur Niederdruckseite: $_nt_p = \frac{66{,}00}{9{,}1439} = 7{,}22^0$, wahre Temperatur $t_n = 7{,}09^0$

» Hochdruckseite: $_nt_p = \frac{71{,}06}{8{,}7097} = 8{,}16^0$, » » $t_h = 8{,}05^0$ } $\Delta t = 0{,}96^0$

$\Delta t_p = 11{,}47\ (-1{,}039) + 12{,}49 + 0{,}05 \cdot 7{,}22 = 0{,}93$ wahre Temperaturdifferenz $\Delta t = 0{,}92^0$

reduzierter Kühleffekt auf 0^0 C und pro 1 kg/cm^2 Druckdifferenz: **0,164**

In den Zahlentafeln 10 und 11 sind zwei Aufschreibungen für Versuche bei verschiedenen Drücken mitgeteilt. Die Kolonnen 2 und 3 enthalten die Widerstandswerte für das Thermometer auf Niederdruckseite, dabei bedeutet E_2 den Vergleichswiderstand, der natürlich immer wieder gleich eingestellt wird und R_n den parallel geschalteten veränderlichen Widerstand. Ganz analog ist die Aufschreibung auf der Hochdruckseite in Kolonne 4 und 5 und entsprechend für den direkten Vergleich der Thermometer in Kolonne 6 und 7. (Da für die verschiedenen Messungen die gleichen Rheostaten dienen, so sind Indices in den Köpfen der Kolonnen angebracht.) Die übrigen 4 Kolonnen bieten nichts Neues.

Auch die Berechnungsart ist überaus einfach, sie muß jedoch mit siebenstelligen Logarithmen durchgeführt werden. Die wahren Temperaturen finden sich aus den Platintemperaturen mit Hülfe der angegebenen Gl. (A), (B), (C) (D) auf Seite 32.

Auch die übrigen hier nicht ausführlich mitgeteilten Versuche weisen keine größeren Aenderungen aller beobachteten Größen auf, alle Versuche wurden bei 10 Minuten Ablesungen auf 1 Stunde ausgedehnt, bei 5 Minuten Ablesungen auf $^1/_2$ bis 1 Stunde. Es war dabei sicher der Beharrungszustand schon bei Beginn der Aufschreibung abgewartet worden.

In Zahlentafel 12 sind alle Mittelwerte der Beobachtungen mitgeteilt und zwar nach dem Druck geordnet. Die Bezeichnungen stimmen mit denen auf den Zahlentafeln 10 und 11 überein. Aus den Kolonnen 2 bis 7 lassen sich dann die beiden Abkühlungswerte in Kolonne 12 und 13 nach der

Zahlentafel 12.

Versuche mit Hartgummiisolierung.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Datum 1909	E_2	R_n	E_1	W_h	R_λ	W_λ	Badtemperatur t_B ^{0}C	Lufttemperatur t_l H. S.	Hochdruckmanometer P kg/cm^2	Druckdifferenz Δp kg/cm^2	Abkühl. als Differenz	Abkühlung direkt	α reduziert 0^0C/kg cm^2	Bemerkungen
I 9. Febr.	23,9	3493	22,9	3237	400	1373	7,00	6,98	6,17	5,97	1,47	1,48	0,249	Luft mit Hartgummiisolierung. Asbestpfropfen. Widerstandsthermometer. Badthermometer in $^1/_5{}^0$ geteilt. Beobachter Vogel
II 10. Febr.	24,0	6040	23,0	5625	400	1368	7,33	7,33	6,17	5,97	1,49	1,48	0,252	
III 13. März	23,8	2312	22,8	2102	400	1371	6,85	6,92	6,55	5,97	1,49	1,49	0,253	
IV 10. März	23,8	2341	22,8	2192	400	1394	6,60	6,70	31,0	5,97	1,43	1,41	0,239	
V 10. Febr.	24,0	3846	23,0	4327	400	1453	7,60	7,65	56,0	5,97	1,23	1,18	0,201	
IV 10. März	23,8	2130	22,8	2199	400	1486	6,65	6,69	71,0	5,97	1,13	1,13	0,195	
VII 11. März	23,8	1934	22,8	1968	400	1472	7,00	7,02	71,0	5,97	1,16	1,16	0,197	
VIII 11. Febr.	24,0	2717	23,0	3371	400	1547	8,05	8,05	112	5,97	0,96	0,92	0,158	
IX 11. März	23,8	1775	22,8	2009	400	1607	6,90	6,95	113	5,97	0,78	0,80	0,136	
X 11. Febr.	24,0	2884	23,0	4166	400	1640	7,75	7,70	161	5,97	0,70	0,69	0,118	

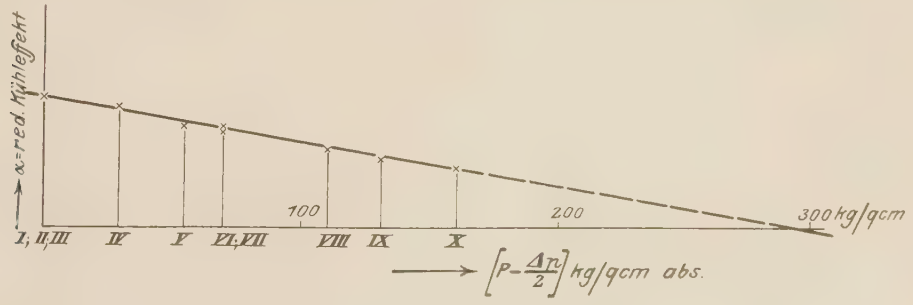


Fig. 49.

angegebenen Weise berechnen, sie kontrollieren einander und stimmen schön überein. Es wurde auf $0{,}005^0$ abgerundet. Auch die Kolonne 8 und 9 zeigt eine gute Uebereinstimmung, so daß also in der Tat die Lufttemperatur auf der Hochdruckseite mit der Badtemperatur übereinstimmt. Es ist dabei zu beachten, daß das Badthermometer in $^1/_5{}^0$ geteilt ist und deshalb die letzte Stelle nur geschätzt werden konnte.

Die Auswertung der Versuche und die Ergebnisse

finden sich dann in Kolonne 14 in der gleichen Zahlentafel, alle Kühlwerte sind zum Vergleich auf 0^0 C. reduziert und auf 1 kg/cm^2 Druckdifferenz umgerechnet.

Man erkennt wiederum eine deutliche Abnahme des Effektes mit steigendem Druck. Unterhalb der Zahlentafel ist dann die Abhängigkeit graphisch aufgetragen; sie zeigt einen linearen Verlauf, die Abweichungen der einzelnen Beobachtungen von der Geraden sind nicht bedeutend.

Versuche mit Widerstandsthermometern bei verschiedener Wärmeisolierung[1]).

Von besonderer Wichtigkeit ist es bei Messungen geringer Temperaturdifferenzen den Einfluß kennen zu lernen, den die bessere oder schlechtere Wärmeisolierung der Luft auf Niederdruckseite gegen die umschließende Wand ausübt. Wie die folgenden Versuche lehren, kann eine mangelhafte Wärmeisolierung ein ganz falsches Bild der Aenderung des Kühleffektes mit dem Drucke geben. Um diesen Einfluß kennen zu lernen, wurden an die Versuche mit Hartgummiisolierung zwei weitere Versuchsreihen angeschlossen. Alle Bedingungen blieben die gleichen, nur wurden an Stelle der 4 Hartgummirohre H und h, welche als Isolierung dienten, das eine Mal 2 Messingrohre eingebaut (eine Kernmessung der Luftströmung sollte dabei nicht vorgenommen werden), das andere Mal 4 Porzellanrohre.

In den Zahlentafeln 12 bis 14 auf Seite 35 und 37 sind die Zusammenstellungen der Versuchswerte gegeben und die daraus abgeleiteten Resultate des Kühleffektes. Unter den Zahlentafeln sind dann die Werte graphisch aufgetragen.

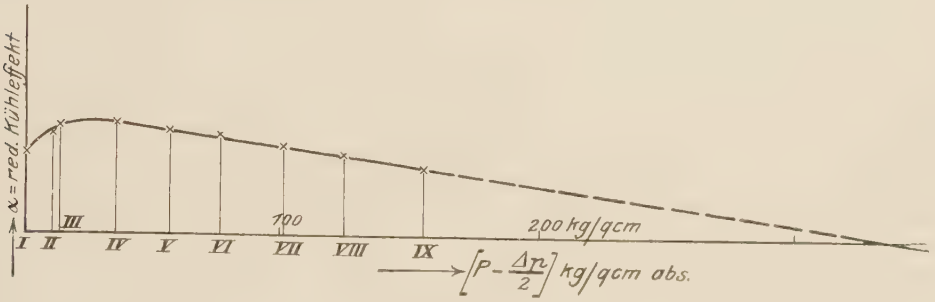
Bei Porzellan und Messing wurde das Wasserbad mit Hülfe eines Beckmann-Thermometers auf konstante Temperatur gehalten. Bei Messing war diese Vorsichtsmaßregel unbedingt erforderlich, da es sich zeigte, daß bei steigender Wassertemperatur ein Abnehmen des Kühleffektes eintrat und umgekehrt. Die Erklärung findet sich leicht. Da nämlich die aus der Schlange in den Hochdruckteil des Apparates eintretende Luft zuerst die Wände des Rohres, welches die Niederdruckseite des Apparates enthält, siehe Fig. 8 Seite 15, umspült, so wird beim Steigen der Badtemperatur infolge der fehlenden Isolierung zuerst eine Einwirkung auf die Luft in der Niederdruckseite durch Wärmeleitung stattfinden. Erst später gelangt die wärmere Luft zum Thermometer auf Hochdruckseite. Da wir die Umkehrung in der Anordnung des Apparates 1 in diesem Falle haben, so erhalten wir in der Tat die umgekehrte Wirkung wie bei jenem Apparate mit Beckmann-Thermometern. Dort bekamen wir mit zunehmender Badtemperatur einen zunehmenden Effekt. Ein Beharrungszustand ist also nur möglich, wenn in solchem Falle die Badtemperatur konstant ist.

[1]) Bei den Versuchen mit Porzellan und Messing wurde ich in dankenswerter Weise von Hrn. Diplomingenieur F. Nöll unterstützt.

Zahlentafel 13.

Versuche ohne Isolierung.

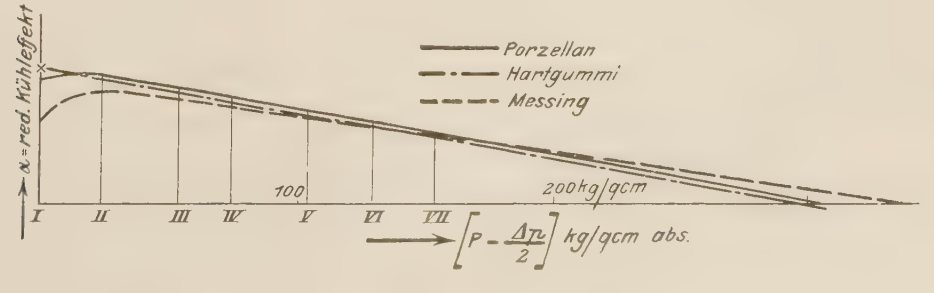
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Datum 1909	E_2	R_n	E_1	W_h	R_Δ	W_Δ	Badtemperatur t_B °C	Lufttemperatur t_e H. S.	Hochdruckmanometer P kg/cm²	Druckdifferenz Δp kg/cm²	Abkühl. als Differenz	Abkühlung direkt	α reduziert 0^0 C/kg/cm²	Bemerkungen
I 11. Mai	23,8	1132	22,8	1194	400	1545	9,1	9,02	6,58	5,97	0,85	0,88	0,152	Luft ohne Isolierung. Badthermometer in $1,0^0$ geteilt. Beobachter: E. Vogel
II 17. Mai	23,8	1158	22,8	1164	400	1469	9,3	9,16	12,00	5,97	1,09	1,08	0,192	
III 15. Mai	23,8	1132	22,8	1132	400	1448	9,3	9,30	15,00	5,97	1,13	1,13	0,201	
IV 14. Mai	23,8	1180	22,8	1165	400	1423	9,3	9,15	37,00	5,97	1,21	1,21	0,215	
V 12. Mai	23,8	1182	22,8	1180	400	1445	9,3	9,17	58,00	5,97	1,14	1,16	0,207	
VI 14. Mai	23,8	1142	22,8	1153	400	1465	9,2	9,21	77,00	5,97	1,08	1,09	0,194	
VII 12. Mai	23,8	1122	22,8	1152	400	1505	9,2	9,22	101,00	5,97	0,99	0,99	0,177	
VIII 13. Mai	23,8	1064	22,8	1110	400	1538	9,6	9,41	126,00	5,97	0,88	0,89	0,159	
IX 13. Mai	23,8	1030	22,8	1094	400	1593	9,6	9,52	156,00	5,97	0,78	0,73	0,130	



Zahlentafel 14.

Versuche mit Porzellanisolierung.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Datum 1909	E_2	R_n	E_1	W_h	R_Δ	W_Δ	Badtemperatur t_B °C	Lufttemperatur t_e H. S.	Hochdruckmanometer P kg/cm²	Druckdifferenz Δp kg/cm²	Abkühl. als Differenz	Abkühlung direkt	α reduziert 0^0 C/kg cm²	Bemerkungen
I 19. Mai	23,8	1166	22,8	1127	400	1385	9,4	9,32	6,20	5,97	1,32	1,34	0,239	Luft mit Porzellanisolierung. Badthermometer in 1^0 geteilt. Beobachter: Vogel Nöll
II 21. Mai	23,8	1158	22,8	1099	400	1375	9,6	9,52	26,0	5,97	1,33	1,38	0,246	
III 21. Mai	23,8	1089	22,8	1065	400	1413	9,7	9,64	56,0	5 97	1,26	1,24	0,222	
IV 24. Mai	23,8	1018	22,8	1010	400	1441	10,0	9,87	76,0	5,97	1,07	1,13	0,202	
V 24. Mai	23,8	986	22,8	1003	400	1493	10,0	10,00	106,0	5,97	0,99	1,00	0,179	
VI 25. Mai	23,8	927	22,8	965	400	1532	10,4	10,24	131,0	5,97	0,81	0,88	0,158	
VII 25. Mai	23,8	935	22,8	986	400	1578	10,2	10,19	156,0	5,97	0,73	0,73	0,131	



Vergleicht man die Resultate der verschiedenen Isolatoren, indem man die Werte graphisch (siehe untere Figur Seite 37) aufträgt, so sieht man, daß bei niederen Drücken die Art der Isolierung eine ganz erhebliche Rolle spielt. Dieser Unterschied schwindet bei Erhöhung des Druckes mehr und mehr, bei 20 at geben Porzellan und Hartgummi bereits die gleichen Werte. Im weiteren Verlaufe liegt sogar die Kurve, welche die Versuchswerte mit Porzellanisolierung verbindet, etwas höher als diejenige mit Hartgummiisolierung, jedoch innerhalb der Versuchsgenauigkeit.

Die Verbindungslinie der Versuche ohne Isolierung bleibt dauernd unter denen mit einer solchen, erreicht sie schließlich bei etwa 150 at.

Am auffälligsten ist bei den Versuchen ohne Isolierung die Erreichung eines Maximums des Kühleffektes. Dies erklärt sich durch die Einwirkung der nicht isolierten Wände, denn bei geringer strömender Luftmenge hat der Wärmefluß von außen durch die Wand des Drosselapparates Zeit bis zum inneren Kern des Luftstromes, wo sich das Thermometer befindet, einzudringen. Bei großer Luftmenge dagegen wird dieser Einfluß immer kleiner, d. h. der Kühleffekt nimmt mit dem Drucke zu.

Die Berechnung des Wärmeverlustes aus den Wärmeleitzahlen der benutzten Isoliermaterialien ist wegen der komplizierten Gestalt des Durchströmapparates umständlich und unsicher. Es erscheint daher leichter und genauer, aus der graphischen Darstellung der bei höheren Drücken erhaltenen Werte des Kühleffektes auf diejenige bei niederem Druck und vollkommener Isolierung zu extrapolieren (siehe die graphische Darstellung auf Seite 37).

Als Gleichung für den Verlauf der drei Kurven, welche die Ergebnisse am besten wiedergibt, erhalten wir:

$$\alpha = 0{,}265 - 0{,}00086\, p,$$

wobei α der reduzierte Kühleffekt bei 0° C und p das arithmetische Mittel aus dem absoluten Drucke vor und hinter der Drosselstelle.

3) Vergleiche der Resultate der verschiedenen Temperaturmeßmethoden untereinander.

Betrachten wir die Ergebnisse der Versuche mit Beckmann-Thermometern, Thermoelementen und Widerstandsthermometern, so zeigen alle drei Meßmethoden eine lineare Abhängigkeit des Kühleffektes vom Druck. Die Neigung der Geraden ist in den drei Fällen nur wenig verschieden. Dagegen ist die Abweichung der absoluten Werte zwischen den Resultaten bei Verwendung von Beckmann-Thermometern und Widerstandsthermometern nicht unbeträchtlich, beim niedrigsten Druck etwa 7,5 vH, und zwar ergeben die Beckmann-Thermometer den höheren Wert.

Wegen der ganzen Anordnung und wegen der größeren Anzahl der Versuche ist jedoch den Beobachtungen mit der elektrischen Meßmethode ein größeres Gewicht beizulegen.

In bezug auf Abhängigkeit vom Druck weicht die Angabe der Thermoelemente nur innerhalb der Versuchsgenauigkeit von denen der Widerstandsthermometer ab. Die Versuche mit Beckmann-Thermometern zeigen dagegen einen stärkeren Einfluß des Druckes, dies dürfte auf einen störenden Einfluß der Thermometerrohre zurückzuführen sein.

Als wahrscheinlichsten Ausdruck für die Abhängigkeit des auf 0° C und 1 at Druckdifferenz reduzierten Kühleffektes ergibt sich die Gleichung:

$$\alpha = 0{,}268 - 0{,}00086\, p.$$

Für $p = \infty$ 308 kg/cm² würde mithin keine Kühlwirkung mehr eintreten.

2B) Drosselversuche mit Sauerstoff.

Es ist nun von größtem Interesse zu ermitteln, wie sich andere Gase, besonders der technisch wichtige Sauerstoff, verhalten in bezug auf die Abhängigkeit des Kühleffektes vom Druck.

Eine solche Untersuchung wurde dadurch möglich, daß sich die Gesellschaft für Linde's Eismaschinen in dankenswerter Weise erbot, den notwendigen Sauerstoff kostenlos zur Verfügung zu stellen.

Für den unmittelbaren Vergleich der Versuche zwischen Luft und Sauerstoff war es besonders empfehlenswert, die Sauerstoffversuche direkt an diejenigen mit Luft bei Anwendung der Hartgummiisolierung anzuschließen und an der ganzen Meß- oder Isolierungseinrichtung gar nichts zu ändern.

Beim Füllen der Gefäße und Rohre der Anlage wurde sehr langsam verfahren, um sicher zu sein, daß der Sauerstoff die Luft gut verdränge. Durch verschiedene Proben wurde festgestellt, daß die Versuche mit 98 vH Sauerstoff vorgenommen wurden [1]).

Nach Beendigung der Versuche mit Sauerstoff wurden wieder solche mit Luft unternommen, nachdem ein Tag lang Luft langsam durch die ganze Anlage durchgepumpt worden war. Diese Kontrollversuche vorher und nachher ergaben eine sehr gute Uebereinstimmung untereinander; man ersieht das aus dem Vergleich des Datums in Zahlentafel 12 Seite 35 und Zahlentafel 15 Seite 40. Es zeigte sich, daß inzwischen keine Aenderung irgend welcher Art an den Thermometern oder sonst am Apparat eingetreten war.

Hierauf wurden die Widerstandsthermometer herausgenommen und nachgeprüft; alle Eichungen, die jedoch nur sehr wenig voneinander abweichen, wurden zur Aufstellung der Formel zur Berechnung der Resultate verwendet.

Da die Anordnung die gleiche war wie bei den Luftversuchen und sowohl in bezug auf Vorversuch und Hauptversuch die gleichen Vorsichtsmaßregeln getroffen worden waren, so sollen hier nur die Resultate angeführt und besprochen werden.

Die Zahlentafel 15 auf Seite 40 zeigt wiederum in den Kolonnen 2 bis 7 die Angaben der beobachteten Widerstände, aus denen dann die Abkühlung (Kolonne 11 und 12) berechnet wird. Auch hier hat man wieder die Kontrolle durch die beiden unabhängigen Messungen für den Kühleffekt, sowie die Uebereinstimmung zwischen Lufttemperatur auf Hochdruckseite und Badtemperatur innerhalb des Schätzungsfehlers.

Die Kolonne 14 enthält dann die auf 0° C pro 1 at reduzierten Werte des Effektes, welche unterhalb der Zahlentafel graphisch aufgetragen sind.

Aus der Zahlentafel sieht man, daß diese Werte alle größer sind, als die entsprechenden bei Luft und außerdem, daß ebenfalls eine Abnahme der Kühlwirkung mit dem Druck vorhanden ist. In der graphischen Zusammenstellung tritt dann zutage, daß hier ebenfalls eine lineare Abhängigkeit herrscht.

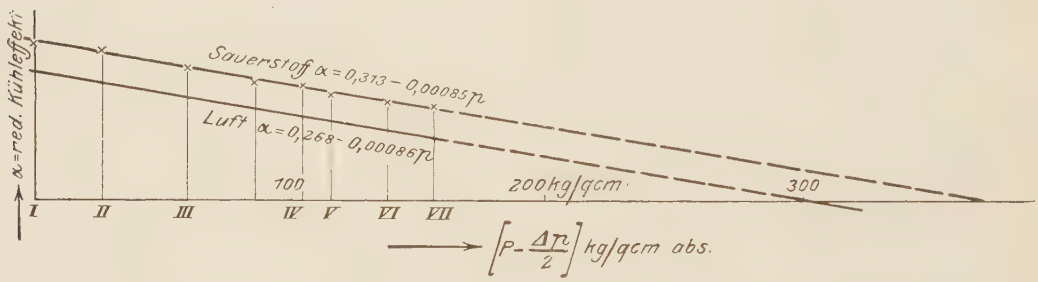
Dieselbe kann durch die Formel dargestellt werden:

$$\alpha = 0{,}313 - 0{,}00085\, p.$$

[1]) Hr. Dr.-Ing. R. Linde nahm die Untersuchung desselben mit einem Orsatapparat vor.

Zahlentafel 15. Sauerstoff-Versuche (mit Hartgummiisolierung).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Bemerkungen
	Datum 1909	E_2	R_n	E_1	W_h	R_Δ	W_Δ	Badtemperatur t_B °C	Lufttemperatur t H.S.	Hochdruckmanometer P kg/cm²	Druckdifferenz Δp kg/cm²	Abkühl. als Differenz	Abkühlung direkt	α reduziert 0^0C/kg/cm²	Bemerkungen
I	26. Febr.	23,8	2956	22,8	2372	400	1302	6,55	6,53	6,10	5,97	1,78	1,75	0,306	Sauerstoff.
II	5. März	23,8	2503	22,8	2120	400	1312	6,80	6,80	28,0	5,97	1,68	1,68	0,294	Hartgummiisolierung. Badthermometer in $^1/_5{}^0$ geteilt. Beobachter: Linde, Vogel.
III	26. Febr.	23,8	1970	22,8	1805	400	1366	7,30	7,29	62,0	5,97	1,49	1,48	0,260	
IV	4. März	23,8	2261	22,8	2183	400	1421	6,70	6,71	88,0	5,97	1,32	1,32	0,231	
V	27. Febr.	23,8	1959	22,8	1933	400	1432	7,10	7,06	107,2	5,97	1,28	1,29	0,226	
VI	3. März	23,8	1661	22,8	1650	400	1453	7,60	7,61	117,8	5,97	1,20	1,18	0,210	
VII	3. März	23,8	1694	22,8	1750	400	1487	7,40	7,41	140	5,97	1,10	1,10	0,193	
VIII	2. März	23,8	1716	22,8	1840	400	1517	7,30	7,23	158	5,97	1,00	1,03	0,181	



Die Werte liegen alle sehr gut in einer Geraden, die Abweichungen sind nur gering.

Die Formel zeigt, daß für $p = 370$ kg/cm² keine Kühlwirkung mehr eintreten würde.

In der Figur ist auch die Gerade für den Kühleffekt der Luft vergleichsweise eingetragen. Die beiden Geraden sind beinahe parallel.

4) Vergleich der Beobachtungsergebnisse mit den Resultaten anderer Forscher.

Es ist nun notwendig, die hier dargelegten Versuche mit denen anderer Forscher zu vergleichen und die experimentellen Ergebnisse mit den Forderungen der Theorie zu prüfen.

Thomson und Joule[1]) haben 1853 ihre ersten Versuche veröffentlicht unter dem Titel: »On the Thermal Effects of Fluids in Motion«. In dieser Veröffentlichung wiesen sie vorerst nur nach, daß beim Durchströmen von Luft durch eine Drosselstelle eine Temperaturveränderung eintritt. Im darauf folgenden Jahr 1854 erschien dann eine sehr ausgedehnte Untersuchung, welche die folgenden Ergebnisse lieferte:

Nr.	1 Druckdifferenz engl. Pfd./Qu.-Z. $P - P'$	2 Druck H. S. engl. Pfd./Qu.-Z.	3 Druck N. S. engl. Pfd./Qu.-Z.	4 Badtemperat. °C	5 Kühleffekt δ °C	6 Zahl der Ablesungen
1	6,345	20,969	14,624	17,006	0,108	100
2	8,138	22,678	14,540	20,125	0,146	221
3	21,416	35,993	14,577	17,744	0,354	47
4	18,617	33,309	14,692	18,975	0,365	40
5	39,865	54,456	14,591	17,809	0,707	80
6	64,457	79,250	14,793	15,483	1,110	120
7	59,190	82,004	22,814	12,734	1,033	40

[1]) Thomson-Joule, Philos. Trans. 1853 S. 357 bis 365, 1854 S. 321 bis 364.

Bildet man aus den verschiedenen Beobachtungen das Verhältnis $\frac{\delta}{P-P'}$, so ergibt sich:

Versuch Nr.	$\frac{\delta}{(P-P')}$ engl. Pfd./Qu.-Z.	Badtemp. ^{0}C	abs. Druck auf N. S. engl. Pfd./Qu.-Z.	
1	0,0170	17,0	14,624	
2	0,0179	20,1	14,540	
3	0,0165	17,7	14,577	Mittel
4	0,0196	19,0	14,692	14,636
5	0,0177	17,8	14,591	
6	0,0172	15,5	14,793	
7	0,0174	12,7	22,814	
Mittel:	0,0176	17,1	15,804	

Die beiden Forscher stellten die Resultate graphisch dar und zeigten, daß der Kühleffekt ziemlich genau proportional der Druckdifferenz vor und hinter der Drosselstelle ist.

Zum besseren Vergleich mit den neuen Versuchen sei obige Zahlentafel umgerechnet für kg/cm². Da 1 kg/cm² = 14,223 engl. Pfd./Qu.-Z. ist, so erhalten wir:

Versuch Nr.	$\frac{\delta}{(P-P')}$ kg/cm²	Badtemp. ^{0}C	abs. Druck auf N. S. kg/cm²	
1	0,2419	17,0	1,028	
2	0,2545	20,1	1,022	
3	0,2347	17,7	1,024	Mittel
4	0,2789	19,0	1,032	1,029
5	0,2518	17,8	1,025	
6	0,2446	15,5	1,039	
7	0,2475	12,7	1,604	
Mittel:	0,2504	17,1	1,110	

Außer den Versuchen mit Luft wurden auch solche mit Kohlensäure und Wasserstoff angestellt, deren Wertangabe ich hier übergehe; es sei nur erwähnt, daß der Wasserstoff beim Abdrosseln eine Erwärmung zeigte statt der bei Luft und Kohlensäure beobachteten Abkühlung.

Im Jahr 1862 [1]) erschien die dritte und letzte Abhandlung über den Kühleffekt. Dieses Mal wurde in ausgedehntem Maße der Einfluß der Temperatur auf die Größe der Kühlwirkung untersucht und zwar für: Luft, Sauerstoff, Stickstoff, Kohlensäure und Wasserstoff.

Hatten die Versuche, die mit verschiedenen Druckdifferenzen ausgeführt worden waren, einen bedeutenden Einfluß dieser Differenz gezeigt, so erwies sich auch die Temperatur der Luft, bei welcher experimentiert wurde, als einflußreich, allerdings in geringerem Maße.

In den beiden Zahlentafeln 16 und 17 seien die Ergebnisse für Luft und Sauerstoff angegeben.

Die letzte Kolonne ist umgerechnet auf kg/cm²

(100 Inch Hg = 253,995 cm Hg = 3,45 kg).

[1]) Thomson-Joule. Phil. Trans. 1862 S. 579 bis 589.

Zahlentafel 16.

Versuche mit Luft von Thomson-Jaule 1862.

Nr.	Luftmenge Kubikzoll pro Minute	Ueberdruck über Atmosphäre in Zoll Quecks.	Badetemperatur in °C	Kühleffekt	Korrektur wegen Wärmeleitung	Korrigierter Kühleffekt	Kühleffekt reduziert auf 100 Zoll Hg	Dauer des Versuches	Kühleffekt pro kg/cm²
				°	°	°	°	'	°
1	3000	83,96	4,499	−0,711	−0,044	−0,755	−0,900	14	−0,261
2	3600	136,19	6,112	−1,11	−0,058	−1,168	−0,858	24	−0,249
3	2600	156,59	6,082	−1,307	−0,094	−1,401	−0,895	15	−0,259
4	1750	139,58	7,471	−1,137	−0,122	−1,259	−0,902	24	−0,261
5	2250	153,9	7,640	−1,231	−0,103	−1,334	−0,867	12,5	−0,251
6	2300	159,3	8,546	−1,252	−0,102	−1,354	−0,850	18	−0,246
7	2060	165,73	8,2	−1,329	−0,121	−1,450	−0,875	14	−0,254
8	1500	129,73	8,72	−1,019	−0,127	−1,146	−0,883	8	−0,256
9	5000	128,9	24,92	−0,983	−0,037	−1,020	−0,791	12	−0,229
10	4600	122,8	27,81	−0,874	−0,036	−0,910	−0,741	26	−0,215
11	5000	123,5	42,64	−0,947	−0,036	−0,983	−0,796	8	−0,231
12	4800	137,0	43,54	−0,943	−0,037	−0,980	−0,715	6	−0,207
13	5000	127,5	47,92	−0,937	−0,037	−0,974	−0,764	6	−0,222
14	3700	147,0	49,96	−0,969	−0,049	−1,018	−0,692	35	−0,201
15	5600	146,0	53,375	−0,860	−0,028	−0,888	−0,608	28	−0,176
16	5700	146,0	64,9	−0,870	−0,029	−0,889	−0,616	24	−0,179
17	2700	112,43	89,901	−0,469	−0,033	−0,502	−0,446	20	−0,129
18	1700	147,0	90,353	−0,821	−0,091	−0,912	−0,620	4	−0,180
19	1700	153,16	92,486	−0,756	−0,083	−0,839	−0,547	19	−0,159
20	3150	156,5	92,603	−0,674	−0,040	−0,714	−0,456	12	−0,132
21	3800	146,0	93,78	−0,700	−0,036	−0,736	−0,504	24	−0,146
22	4600	158,5	97,528	−0,722	−0,029	−0,751	−0,474	20	−0,137

Zahlentafel 17.

Versuche mit Sauerstoff von Thomson-Jaule 1862.

Nr.	Gasmenge in Kubikzoll pro Minute	Ueberdruck über at in Zoll Quecksilber	Zusammensetzung des Gases	Badtemperatur in °C	Kühleffekt	Korrektur wegen Wärmeleitung	Korrig'erter Effekt	Effekt reduziert auf 100 Zoll Hg	Berechnet für reinen Sauerstoff	Versuchsdauer in Minuten	Kühleffekt pro kg/cm²
					°	°	°	°	°	'	°
1	2000	159,28	N 5,095 O94,905	8,682	−1,547	−0,145	−1,692	−1,061	−1,075	9	−0,312
2	2000	161,81	N54,62 O45,38	8,75	−1,373	−0,129	−1,502	−0,928	−1,074	11	−0,311
3	1700	151	N 3,64 O96,36	89,466	−1,069	−0,118	−1,187	−0,786	−0,800	14	−0,232
4	3150	159,77	N22,37 O77,63	90,8	−0,840	−0,050	−0,890	−0,557	−0,580	12	−0,168
5	3150	154,1	N51,03 O48,97	92,792	−0,734	−0,043	−0,777	−0,504	−0,527	12	−0,153
6	4500	152	N 4 O96	95,453	−0,795	−0,033	−0,828	−0,544	−0,570	11	−0,165

Aus dieser Versuchsreihe ergibt sich, daß der Kühleffekt mit der Temperatur abnimmt, und zwar nach der Formel

$$dT = 0{,}267 \left(\frac{273}{T}\right)^2 \text{ für kg/cm}^2.$$

Beachtet man noch die vorher gefundene Abhängigkeit vom Druck, so erhält man allgemein die Formel für die Temperaturerniedrigung von Luft:

$$dT = \alpha \frac{273^2}{T^2} dp,$$

wobei α für die erste Versuchsreihe 0,283 und für die zweite 0,267 bezogen auf kg/cm² zu setzen ist.

Verwenden wir für die Werte von Sauerstoff die gleichartig gebaute Formel wie für Luft, so bekommen wir für α die Werte:

0,334, 0,334, 0,409, 0,334, 0,275, 0,302,

woraus als Mittel für α zu setzen 0,331.

Anschließend an ihre Versuche entwickelten Thomson und Joule eine Zustandsgleichung der Gase, ausgehend von der von ihnen zuerst aufgestellten Beziehung:

$$c_p \frac{dT}{dp} = -A\left(T\frac{\partial v}{\partial T} - v\right),$$

wobei T die absolute Temperatur bedeutet, p den Druck, v das Volumen, $A = \frac{1}{427}$, Wärmewert der Arbeitseinheit, und c_p die spezifische Wärme der Gase bei konstantem Druck.

Da $\frac{dT}{dp} = \alpha\left(\frac{273}{T}\right)^2$ nach ihren Versuchen als eine bekannte Funktion erscheint, fanden Thomson und Joule durch einfache Integration

$$v = \frac{RT}{p} - \frac{\alpha}{3}\frac{c_p}{A}\frac{p}{T^2}273^2,$$

wobei sie c_p als unveränderlich betrachteten.

Diese wichtigen Versuche wurden der Ausgangspunkt für eine große Anzahl von theoretischen Betrachtungen; aus denselben ergibt sich, daß der Kühleffekt notwendig auch eine Funktion des absoluten Druckes sein müsse und nicht nur der Druckdifferenz.

Um die Versuchsergebnisse von Thomson-Joule mit den unserigen, oben mitgeteilten zu vergleichen, sei zusammenfassend nochmals bemerkt:

Bei ihren ersten Versuchen hatte sich für α der Wert 0,283 ergeben, später wurde er ersetzt durch 0,267 infolge der Untersuchungen bei höheren Temperaturen. Fassen wir jedoch auch bei der dritten Abhandlung die für uns maßgebenden niederen Temperaturen allein ins Auge, so erhalten wir folgende Tabelle:

Lufttemp. °C	Kühleffekt pro kg/cm²	auf 0° C und pro kg/cm² red.
4,5	0,261	0,269
6,1	0,249	0,260
6,1	0,259	0,270
7,5	0,261	0,282
7,6	0,251	0,270
8,5	0,246	0,262
8,2	0,254	0,270
8,7	0,256	0,273
		Mittel: 0,269

nehmen wir hierzu noch den ersten Wert 0,283 bei 17,1°, so erhalten wir

$$\alpha = 0{,}271.$$

Dies stimmt mit den vorliegenden Versuchen sehr gut überein, wenn wir sie auch auf die Temperatur der Luft auf Hochdruckseite reduzieren, wie Thomson und Joule, denn bei gewöhnlichem Atmosphärendruck ergibt sich aus diesen:

$$\alpha = 0{,}268.$$

Nicht so gut stimmt der neuerdings erhaltene Wert von Sauerstoff: 0,314 mit demjenigen überein, der von Thomson und Joule gefunden wurde, als Mittel: 0,331. Allerdings ist hier zu beachten, daß dieser letztere Wert nur aus einer recht geringen Anzahl von Versuchen abgeleitet ist, die untereinander bis zu 8 vH abweichen. Da wir aber den mit Widerstandsthermometern gefundenen Wert für Luft auf Grund der übrigen Versuche etwas erhöhen mußten, so wird das Gleiche bei Sauerstoff richtig sein; wir hätten dann für Sauerstoff

$$\alpha = 0{,}320$$

zu setzen.

Natanson[1]) wiederholte die Versuche von Thomson und Joule mit Kohlensäure. Seine Versuchseinrichtung ist nicht sehr verschieden von derjenigen, die Thomson und Joule benutzten, nur entnimmt er die Kohlensäure einer Bombe, so daß die Pumpeinrichtung, die sonst notwendig ist, wegfällt. Die Gastemperatur wird durch Quecksilberthermometer gemessen. Durch besondere Versuche wird festgestellt, daß die Gastemperatur auf Hochdruckseite gleich der Badtemperatur ist. Der höchste verwendete Druck beträgt 25 at. Natanson findet, daß die Abkühlung mit dem Druck zunimmt und gibt dabei die Formel an:

$$\frac{d\,T}{d\,p} = 1{,}18 + 0{,}0126\ p.$$

Dies Resultat ist sehr auffallend, da aus theoretischen Gründen eine Abnahme der Abkühlung mit dem Druck zu erwarten ist (s. S. 45 u. f.).

In der Tat fand auch Kester[2]) im Gegensatz zu Natanson eine Abnahme der Abkühlung. Kester untersuchte ebenfalls das Verhalten der Kohlensäure, seine Versuche erstrecken sich bis zu 40 at abs. Druck. Seine Versuchsanordnung unterscheidet sich hauptsächlich dadurch von derjenigen von Natanson, daß er die Temperaturmessung elektrisch mit Hülfe von Thermoelementen ausführt. Dabei verwendet er die Ausschlagmethode. Als Resultat seiner Beobachtungen gibt er die Formel:

$$\frac{d\,T}{d\,p} = 1{,}19 - 0{,}0015\ p.$$

Da die Drosselversuche zur Bestimmung der Abhängigkeit der spezifischen Wärmen von größter Wichtigkeit sind, so hat man sie vielfach angewandt, um die spezifische Wärme des Wasserdampfes zu ermitteln. R. Linde[3]) hat in seiner Arbeit, in welcher die Versuchsresultate von Knoblauch, Linde und Klebe[4]) »über die thermischen Eigenschaften des gesättigten und des überhitzten Wasserdampfes zwischen 100° und 180° C« besprochen werden, eingehend die Drosselversuche von Grindley[5]) und Griesmann[6]) untersucht.

Aus den Resultaten beider Forscher leitet er für Wasserdampf die Gleichung ab:

$$\frac{d\,t}{d\,p} = \frac{a}{T^3\,(1 + b\,p)}.$$

[1]) Natanson, Ueber die Abkühlung der Kohlensäure usw. Annalen der Physik u. Chemie 1887 Bd. 31 S. 502 bis 526.

[2]) Kester, Der Joule-Thomson-Effekt in Kohlensäure. Phys. Zeitschrift, 6. Jahrgang Nr. 2 S. 44 bis 50.

[3]) R. Linde, Theoretische Folgerungen. Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 21 S. 17 bis 58.

[4]) Knoblauch, Linde, Klebe, Die thermischen Eigenschaften. Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 21.

[5]) Grindley, An experimentel investigation etc. Phil. Trans. Bd. 194 1900 S. 1.

[6]) Griesmann, Beitrag zur Frage usw. Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 13 S. 1 bis 57.

Diese Formel gibt mithin für Wasserdampf in der gleichen Weise eine Abnahme des Kühleffektes mit zunehmendem Druck, wie dieselbe in der vorliegenden Untersuchung für Luft und Sauerstoff festgestellt wurde.

Zusammenfassend ergibt der Vergleich der Versuche mit denen von Natanson, Kester, Grindley und Griesmann das Folgende:

Aus allen unseren Beobachtungen, die mit den verschiedenen Meßmethoden und Isolierungen vorgenommen wurden, hat sich gezeigt, daß für Luft und Sauerstoff der Kühleffekt sehr stark mit dem Drucke abnimmt. Daß Kohlensäure eine andere Abhängigkeit zeigen sollte, ist auf Grund von theoretischen Betrachtungen ausgeschlossen. Da außerdem Kester (l. c.) für Kohlensäure ebenfalls eine Abnahme des Kühleffektes mit zunehmendem Drucke nachgewiesen hat, so möchte ich glauben, daß irgend ein Fehler bei der Durchführung der Versuche von Natanson das Resultat fälscht. Daß dies in der Tat sehr leicht vorkommen kann, haben bei den Versuchen mit Beckmannthermometern die Temperaturänderungen der Luft gezeigt, andererseits die Messungen mit verschiedenen Wärmeisolatoren. Es spricht um so mehr dafür, als die Versuche von Natanson nur kurze Zeit dauerten und die Temperaturmessungen mit Quecksilberthermometern vorgenommen wurden.

Die Versuche von Kester mit Thermoelementen verdienen wegen dieser Meßmethode ein größeres Vertrauen in qualitativer Hinsicht, doch ist der Druckbereich so klein, daß eine Extrapolation nicht rätlich ist; ausgedehntere Versuche wären daher zur Klärung der Frage sehr notwendig.

Die Versuche von Grindley und Griesmann weisen nun ebenfalls eine Abnahme des Kühleffektes mit dem Druck auf, stehen damit mit unseren Versuchen im Einklang.

Die hier mitgeteilten neuen Versuche stimmen somit sowohl qualitativ als quantitativ mit denen anderer Experimentatoren gut überein.

5) Theoretische Betrachtungen.

Die mit Luft und Sauerstoff hier mitgeteilten Versuche lassen als wahrscheinlich erscheinen, daß bei einem bestimmten, für jede Gasart verschiedenen Druck beim Durchströmen einer Drosselstelle keine Temperaturänderung erscheint. Treibt man in unseren Versuchsformeln die Extrapolation bezüglich des Druckes noch über diesen Punkt hinaus, so müßte bei Luft und Sauerstoff, falls der absolute Druck genügend gesteigert wird, sogar beim Drosseln eine Temperaturerhöhung sich zeigen.

Von einigen Forschern ist bereits hierauf hingewiesen worden. Da diese Untersuchungen auch für die Technik von Bedeutung sind und daraus auch die physikalische Rechtfertigung sich erweist, die Versuchsresultate, die mit verschiedenen Gasen unternommen wurden, miteinander zu vergleichen, so sollen die Betrachtungen, wie sie von Bouty [1]), Schiller [2]), Rose-Innes [3]), Love [4]), Porter [5]), Dickson [6]) und Witkowsky [7]) ausgeführt wurden, kurz angegeben und besprochen werden.

[1]) Bouty, Journ de phys. (2) 8 S. 20 bis 28 1889.
[2]) Schiller, Annalen der Physik u. Chemie 1890 Bd. 40 Neue Folge S. 149 bis 156.
[3]) Rose-Innes, Phil. Mag. Bd. 45 S. 227 1898.
[4]) Love, Phil. Mag. (5) 48 S. 106 1899.
[5]) Porter, Phil. Mag. (6) 11 S. 554 1906.
[6]) Dickson, Phil. Mag. (6) 15 S 126 1908.
[7]) Witkowsky, Anzeiger der Akademie Krakau S. 282 1898.

Empirisch hatte Rose-Innes gezeigt, daß die Versuche von Thomson-Joule auch darstellbar sind durch die Form

$$\frac{dT}{dp} = \frac{\alpha}{T} - \beta \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1),$$

wobei die Konstanten α und β für verschiedene Gase verschiedene Werte besitzen. Aus dieser Gleichung ergibt sich, daß unabhängig vom Druck von einer genügend hohen Temperatur an, wenn nämlich $\frac{\alpha}{T} < \beta$ ist, bei der Entspannung eine Temperaturerhöhung, also eine Umkehrung des Kühleffektes eintritt. Aus den Versuchen von Thomson und Joule fand Rose-Innes die Werte:

	α	β
für Luft	141,5	0,697
für Wasserstoff	64,1	0,331
für Kohlensäure	2615	4,98

Love seinerseits wies nach, daß die Gleichung von der Form:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{\alpha'}{T^2} - \beta' \quad \ldots \ldots \ldots \quad (2),$$

wobei jedoch α' und β' andere Zahlenwerte sind, auch den Thomson-Jouleschen Versuchen genügt. Dieser Forscher sowie Bouty und Schiller zeigten, daß obige beide Formen der Gleichung aus der Zustandsgleichung für Gase von van der Waals bezw. Clausius abgeleitet werden können.

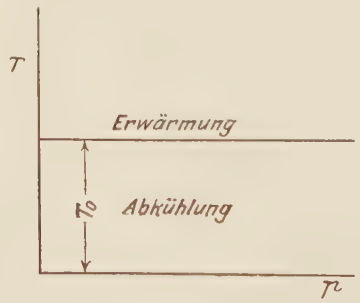
Da beide Gleichungen den Druck nicht enthalten, so würde danach oberhalb einer bestimmten Temperatur T_0 eine Erwärmung, unterhalb derselben aber Abkühlung eintreten und zwar bei jedem Druck.

Trägt man auf zwei Koordinatenachsen als Abszissen die Drücke und als Ordinaten die absoluten Temperaturen auf, so ist der Ort, wo Nullwirkung des Effektes eintritt, eine Parallele zur Abszissenachse im Abstand T_0, wo

$$\text{nach Rose-Innes: } T_0 = \frac{\alpha}{\beta}$$

$$\text{» Love: } \qquad T_0 = \overset{+}{(-)} \sqrt{\frac{\alpha'}{\beta'}}.$$

Durch diese Gerade wird die Ebene in zwei Regionen getrennt. Bei einer Temperatur oberhalb T_0 findet Erwärmung statt und darunter Abkühlung, welchen Wert auch der Druck haben mag.



Es läßt sich nun leicht nachweisen, daß wir es hier nur mit einer ersten Annäherung zu tun haben und daß, wenn wir sowohl bei der Zustandsgleichung von van der Waals als auch bei der von Clausius Glieder höherer Ordnung mit heranziehen, die Nullwirkung abhängig ist vom Druck.

Die Zustandsgleichung von van der Waals lautet:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3).$$

Dabei sind a und b die Konstanten, die mit der Art des Gases wechseln; für Luft hat man zum Beispiel:

$$a = 0{,}002312; \; b = 0{,}00197,$$

wenn $v = 1$ angenommen wird und $p = 1$ alte Atmosphäre. Hieraus findet sich dann weiter:

$$RT = 1{,}000337.$$

Wir schreiben die obige Gleichung in die Form:

$$v - b = \frac{RT}{p} - \frac{a}{pv} + \frac{ab}{pv^2}.$$

Die beiden letzten Glieder auf der rechten Seite dieser Gleichung sind Korrektionsgrößen, will man aus ihnen v eliminieren, so genügt es, wenn wir hierbei als Näherungsformel die Zustandsgleichung der idealen Gase benutzen:

$$pv = RT \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4).$$

Man erhält dann:

$$v = \frac{RT}{p} - \frac{a}{RT} + \frac{abp}{R^2T^2} + b.$$

Als Grundgleichung für den Kühleffekt haben wir nach Thomson-Joule[1])

$$c_p \frac{dT}{dp} = A\left(T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5),$$

wobei der Index p bedeutet, daß bei der Differentiation der Druck p konstant anzunehmen ist.

Wir bilden nun:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p} + \frac{a}{RT^2} - \frac{2abp}{R^2T^3}$$

und bekommen:

$$T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v = \frac{2a}{RT} - \frac{3abp}{R^2T^2} - b,$$

so daß

$$c_p \frac{dT}{dp} = A\left(\frac{2a}{RT} - \frac{3abp}{R^2T^2} - b\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5\,a).$$

Außerdem ist aber zu beachten, daß auch c_p aus der Zustandsgleichung zu entwickeln ist.

Aus der Thermodynamik ist ja die Beziehung bekannt:

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = -AT\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p,$$

wir bekommen als zweite Ableitung aus der obigen Näherungsgleichung:

$$\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p = -\frac{2a}{RT^3} + \frac{6abp}{R^2T^4},$$

dies eingesetzt gibt die Gleichung:

$$c_p = A\int\left[\frac{2a}{RT^2} - \frac{6abp}{R^2T^3}\right]dp + \varphi(t) = \frac{2Aap}{RT^2} - \frac{3abAp^2}{R^2T^3} + c_{p0} \quad . \quad . \quad (6),$$

[1]) Vergl. z. B. M Planck, Vorles. über Thermodynamik 1905 S. 123.

wenn c_{p_0} die spezifische Wärme für den Druck $p = 0$. Man erhält also für den Drosseleffekt durch Einsetzen in die Gl. (5) die Beziehung:

$$\left[\frac{2Aap}{RT^2} - \frac{3abAp^2}{R^2T^3} + c_{p0}\right]\frac{dT}{dp} = A\left(\frac{2a}{RT} - \frac{3abp}{R^2T^2} - b\right) \quad . \quad . \quad . \quad (7).$$

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß die Temperaturänderung infolge der Drosselung vom Druck p abhängig ist einerseits durch das zweite Glied auf der rechten Seite der Gleichung, anderseits aber auch weil c_p, wie dessen Ausdruck zeigt, eine Funktion von p ist.

Vernachlässigt man die Glieder mit dem Produkt ab, welche im allgemeinen bei niederem Druck klein sind, so erhält man die einfachere Beziehung:

$$\left[\frac{2Aap}{RT^2} + c_{p0}\right]\frac{dT}{dp} = A\left(\frac{2a}{RT} - b\right);$$

rechts steht dann in der Tat der Ausdruck, wie er von Rose-Innes u. a. angegeben wird.

Links dagegen ist immer noch der Einfluß von p zu sehen, so daß auch in diesem Falle $\frac{dT}{dp}$ mit wachsendem Druck abnehmen würde, ohne allerdings einen Nullwert zu erreichen.

Erst wenn man c_p als konstant betrachtet, erhält man genau den Wert von Rose-Innes.

Berücksichtigen wir dagegen auch die Glieder mit dem Produkt der kleinen Koeffizienten a und b, so bekommen wir aus der Gl. (5a) für einen Nullwert die Bedingung:

$$\frac{2a}{RT} - \frac{3abp}{R^2T^2} - b = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8),$$

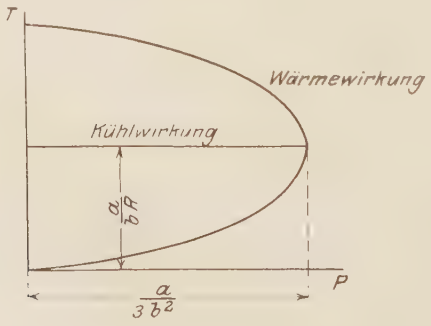
Diese Gleichung ist quadratisch für T und linear für p, d. h.:

Jedem Druck entsprechen zwei Werte für T, bei denen weder Abkühlung noch Erwärmung beim Drosselvorgang eintritt, dagegen gibt es für eine bestimmte Temperatur nur einen einzigen Wert von p, wo dies eintreten kann.

Man kann der Gleichung auch die Form geben:

$$\left(T - \frac{a}{Rb}\right)^2 = \frac{a^2}{R^2b^2}\left(1 - \frac{3b^2}{a}p\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8a).$$

Stellen wir dieselben graphisch dar, wobei wir wiederum p als Abszissen und T als Ordinaten auftragen, so zeigt sich ohne weiteres, daß die Kurve eine Parabel darstellt, deren große Achse im Abstand $\frac{a}{bR}$ von der Abszissenachse entfernt ist. Der Scheitel hat den Abstand $\frac{a}{3b^2}$ von der Ordinatenachse, die Ordinatenachse wird im Koordinatenanfangspunkt und im Abstand $\frac{2a}{bR}$ geschnitten.



In dem Ebenenstück, das von der Ordinatenachse und der Parabel abgegrenzt wird, haben wir Kühlwirkung außerhalb: Wärmewirkung; auf der Parabel: Nullwirkung. Rechnen wir aus der Gl. (8) mit den auf S. 47 gegebenen Koeffizienten den Wert für p aus, bei welchem für die Temperatur $T = 273°$, also 0° C die Nullwirkung eintritt, so bekommen wir p angenähert 200 at.

Dies stimmt mit unseren Versuchen, nach denen bei der Extrapolation die Nullwirkung bei 300 at, stattfindet, nicht gut überein. Es rührt dies davon her, daß bei hohen Drücken auch für die Korrektionsgrößen die Näherungsformel $pv = RT$ nicht mehr angenommen werden darf.

Eine größere Genauigkeit erhält man für die Aufstellung der Nullkurve, wenn man den Weg einschlägt, den Porter (l. c.) angegeben hat, von dem der Begriff der Nullkurve zum erstenmal eingeführt worden ist.

Er geht ebenfalls von der charakteristischen Gl. (5) für den Kühleffekt aus:

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right) = A\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right];$$

man hat offenbar keine Temperaturänderung, wenn:

$$T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v = 0.$$

Porter behandelt weiter sowohl die Gleichung von van der Waals als auch eine von Dieterici und zwar in ihrer »reduzierten« Form.

Die Gleichung von van der Waals[1]) schreibt sich dann:

$$\left(\pi + \frac{3}{\psi^2}\right)(3\psi - 1) = 8\vartheta \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9),$$

worin:

$$\pi = \frac{p}{p_k}; \quad \psi = \frac{v}{v_k}; \quad \vartheta = \frac{T}{T_k},$$

und p_k, v_k, T_k die kritischen Daten sind. Druck, Volumen und Temperatur sind also ausgedrückt in Bruchteilen des kritischen Druckes, des kritischen Volumens, der kritischen Temperatur, π ist der sogenannte reduzierte Druck, ψ das reduzierte Volumen, ϑ die reduzierte Temperatur.

Die charakteristische Gleichung für die Inversionspunkte nimmt dann die Form an:

$$\vartheta\left(\frac{\partial \psi}{\partial \vartheta}\right) - \psi = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (10),$$

oder in Verbindung mit Gl. (9)

$$\frac{-8\vartheta}{3\psi - 1} + \frac{6}{\psi^2}(3\psi - 1) = 0.$$

Löst man diese Gleichung nach γ auf, so bekommt man:

$$\vartheta = \frac{3(3\psi - 1)^2}{4\psi^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11).$$

Aus Gl. (9) und (11) bekommt man dann eine Beziehung zwischen π und ψ:

$$\pi = \frac{9}{\psi^2}(2\psi - 1) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (12).$$

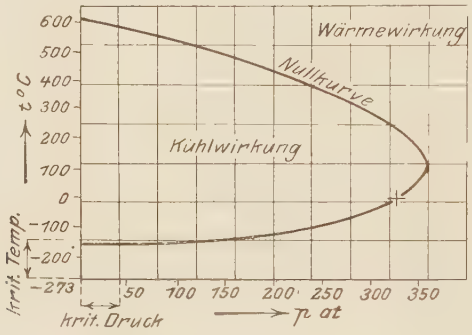
Betrachtet man ψ als unabhängigen Parameter, so kann man die beiden Gl. (11) und (12) zusammen als Kurvengleichung für die Abhängigkeit

[1]) Nernst, Theoretische Chemie 1909, 5. Aufl. S. 225.

von π und ϑ verwenden. Durch Elimination von ψ aus beiden Gleichungen erhält man die Beziehung zwischen Druck und Temperatur unmittelbar:

$$\vartheta = {}^3/_4 \frac{\left[3\,\frac{18 \pm \sqrt{18^2 - 4\,\pi\,9}}{2\,\pi} - 3\right]^2}{\left[\frac{18 \pm \sqrt{18^2 - 4\,\pi\,9}}{2\,\pi}\right]^2} \quad \ldots\ldots (13).^1)$$

In nebenstehender Figur ist die Beziehung zwischen π und ϑ graphisch aufgetragen; die Abszissen stellen die reduzierten Drücke, die Ordinaten die reduzierten Temperaturen dar. Außerdem sind für Luft die absoluten Daten eingeschrieben; als kritischer Druck wurde nach Olzewski 40 at und als kritische Temperatur -140^0 angenommen.



Auch diese Kurve scheidet die Ebene in zwei Zonen, in der einen findet Abkühlung statt, in der anderen Erwärmung. Rechnen wir bei dieser Kurve für 0^0 C den Druck für die Nullwirkung aus, so bekommen wir 320 Atm, während bei unseren Versuchen durch Extrapolation 308 gefunden wird. Die Uebereinstimmung ist also recht befriedigend.

Führen wir die gleiche Rechnung für Sauerstoff aus, so ergeben die kritischen Daten nach Olzewski:

$$t_x = -\,118^0\ \text{C};\quad p_x = 51{,}7\ \text{kg/qcm}$$

für 0^0 C den Druck: 362 kg/qcm für die Nullwirkung. Die Extrapolation führte zu rd. 370 at, also eine beinahe vollkommene Uebereinstimmung.

Wie es hier mit der van der Waalsschen Zustandsgleichung geschehen ist, kann man die Nullkurve auch für die Clausiussche Gleichung entwickeln. Diese lautet in ihrer ersten Form:

$$\left(p + \frac{a'}{T(v+c)^2}\right)(v - b') = RT \quad \ldots\ldots (14).$$

Vernachlässigt man wiederum die kleinen Größen und bezeichnet die Korrektionsglieder mit Hülfe der Näherungsformel: $pv = RT$, so erhält man schließlich statt der obigen Gl. (5a):

$$c_p \frac{dT}{dp} = A\left(\frac{2\,a'}{R\,T^2} - \frac{3\,a'b\,p}{R^2\,T^3} - b'\right)$$

und daher

$$\frac{2\,a'}{R\,T^2} - \frac{3\,a'b'p}{R^2\,T^3} - b' = 0$$

[1]) Erst während der Drucklegung erhalte ich Kenntnis von der interessanten Arbeit von A. Fliegner: »Die Kurven konstanter Erzeugungswärmen für elastische Flüssigkeiten«, Vierteljahresschrift d. naturforsch. Ges. Zürich, Bd. 55, 1910. Die obige Gleichung erhält dort die einfachere Form: $\pi = 12\sqrt{12\,\vartheta} - 12\,\vartheta - 27$.

als Gleichung für die Nullkurve. Die Kurve geht nicht durch den Koordinatenanfangspunkt, ähnelt also mehr der Porterschen Kurve und ist von höherer Ordnung.

Das erste Glied der vorletzten Gleichung hat die Form, welche Thomson Joule der Reduktionsformel gaben, das zweite Glied gibt die Abhängigkeit vom Drucke an, das dritte zeigt, daß auch bei niederen Drücken eine Umkehr des Effektes eintreten kann.

Man wird daher für die Reduktionsformel des Kühleffektes allgemein schreiben können:

$$\frac{\Delta t}{\Delta p} = \left(\frac{A_0}{T} + \frac{A_1}{T^2}\right) - \left(\frac{B_0}{T^2} + \frac{B_1}{T^3}\right) p - C \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

und sich dadurch sowohl der van der Waalsschen als auch der Clausiusschen Zustandsgleichung am besten nähern.

Die Konstanten müssen dann auf Grund von Versuchen bei verschiedenen Temperaturen ermittelt werden.

Setzt man dann diesen allgemeinen Ausdruck gleich null, so bekommt man die Nullkurve.

Für die hier bei Zimmertemperatur vorgenommenen Versuche genügt als erste Annäherungsform:

$$\frac{\Delta t}{\Delta p} = \frac{A_1 - B_0 p}{T^2} \quad , \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16),$$

welche wir auch im Vorhergehenden angewendet haben.

6) Einige Folgerungen aus den Drosselversuchen und den Nullkurven.

Bei den Methoden, die in der Technik Verwendung finden, um schwer koerzible Gase in großen Mengen zu verflüssigen, läßt man nach dem Vorgange von C. v. Linde die Gase von einem hohen Druck auf einen niederen expandieren. Die dabei auftretende Temperaturerniedrigung beim Drosselungsvorgang wird dann benutzt, um mit Hülfe des Gegenstromprinzipes das Gas allmählich bis zur Verflüssigungstemperatur herunter zu kühlen. Es ist nun wirtschaftlich von größter Wichtigkeit zu wissen, ob eine Steigerung der verwendeten Drücke einen wesentlichen Gewinn der Leistung mit sich bringt. Die ursprüngliche Formel von Thomsen-Joule wies auf eine möglichst hohe Druckdifferenz hin, die praktischen Resultate bei der Herstellung von flüssiger Luft dagegen deuteten darauf hin, daß der Gewinn bei Ueberschreitung gewisser Grenzen nur gering ist[1]). Unsere durch Versuche abgeleitete Formel zeigt in der Tat, daß nicht konstruktive Ursachen diesen geringeren Effekt bei höheren Drücken mit sich bringen, sondern daß dies eine Eigenschaft der Gase ist.

Eine Untersuchung mit Hülfe der Nullpunktkurve zeigt ebenfalls auf eine einfache Weise, daß falls die Druckdifferenz allzuweit getrieben wird, beim Drosselvorgang überhaupt keine Kältewirkung mehr eintritt, ja daß unter Umständen sogar eine Wärmewirkung erzeugt werden kann. Wir hatten für Gl. (16) gefunden:

$$d T = \frac{a - b p}{T^2} \, d p;$$

wobei vermutlich b eine Funktion der Temperatur ist.

[1]) Siehe auch: W. P. Bradley und C. F. Hale, The nozzle expansion etc. Phys. Review 1909 Bd. 29 Nr. 3 S. 258 bis 291.

Die Integration ergibt:

$$\int T^2 dT = \int a\,dp + \int bp\,dp$$

$$T_1^3 - T^3 = 3a(p_1 - p) - \frac{3b}{2}(p_1^2 - p^2),$$

wenn Temperatur und Druck auf der Hochdruckseite mit T_1, p_1, auf der Niederdruckseite mit T, p bezeichnet werden.

Da hieraus:

$$T = \sqrt[3]{T_1^3 - 3a(p_1 - p) + {}^3/_2\, b(p_1^2 - p^2)},$$

so ist die Abkühlung:

$$\delta = T_1 - T = T_1 - \sqrt[3]{T_1^3 - 3a(p_1 - p) + {}^3/_2\, b(p_1^2 - p^2)} \quad . \quad (17).$$

Dieser Ausdruck geht in die von C. v. Linde[1]) zuerst abgeleitete Formel über, wenn man $b = 0$ setzt, also die Formel von Thomson-Joule verwendet.

Diese Abkühlung wird null, wenn

$$3a(p_1 - p) = {}^3/_2\, b(p_1^2 - p^2)$$

oder:

$$p_1 + p = \frac{2a}{b}.$$

Man hat somit als Bedingung:

Kühlwirkung: $p_1 + p < \frac{2a}{b}$

Nullwirkung: $p_1 + p = \frac{2a}{b}$

Wärmewirkung: $p_1 + p > \frac{2a}{b}$.

Es ist nun absolut nicht möglich, diese Erscheinungen durch äußere Arbeit zu erklären, wie auch Bradley und Hale (l. c.) hervorheben, sondern es sind die Wirkungen der Kräfte innerhalb der molekularen Struktur der Gase; somit wird auch durch diese neuesten Ergebnisse der bekannte Streit, ob die Gasverflüssigung nach dem Lindeschen Verfahren durch äußere oder innere Arbeit erfolgt, zugunsten der letzteren Auffassung entschieden.

Der durch Gl. (17) gefundene Ausdruck δ dient außerdem dazu, das Verhalten der spezifischen Wärme c_p auszudrücken; es ist ja, wie Linde (l. c.) gezeigt hat:

$$c_p = c_{p0}\left(1 - \frac{d\delta}{dT}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18),$$

wobei c_{p0} die spezifische Wärme bei unendlich kleinem Druck bedeutet und δ die Abkühlung bei der Abdrosselung bis zum Druck $p = 0$ at.

Durch Differentiation erhalten wir, da für diesen besonderen Fall:

$$\delta = T - \sqrt[3]{T^3 - 3ap + {}^3/_2\, bp^2}$$

$$\frac{d\delta}{dT} = 1 - \left[1 - \frac{3\left(ap - \frac{b}{2}p^2\right)}{T^3}\right]^{-2/3}$$

[1]) C. v. Linde, Erzielung niedrigster Temperaturen, Wied. Ann. 1896 Bd. 57 S. 328.

und durch Einsetzen in Gl. (18)

$$c_p = c_{p0}\left[1 - \frac{3}{T^3}\left(ap - \frac{b}{2}p^2\right)\right]^{-\frac{1}{3}}$$

solange bei wachsendem p, $ap > \frac{b}{2}p^2$ ist, nimmt die spezifische Wärme mit dem Druck zuerst zu, um dann allmählich wieder auf den Wert c_{p0} zu sinken, den es erreicht, wenn die Kühlwirkung null wird.

Später würde c_p, wenn der gleiche lineare Verlauf auch für die Wärmewirkung gültig ist, mit wachsendem Drucke stetig abnehmen.

Andererseits zeigt die Formel, daß bei konstantem Drucke die spezifische Wärme mit der Temperatur stetig abnimmt. Es ist aber zu beachten, daß die obige Formel nur für Temperaturen innerhalb des Kühlgebietes anwendbar ist. Betrachten wir nämlich die Nullkurven, so ist aus denselben ersichtlich, daß auch bei konstantem Druck mit steigender Temperatur nicht nur δ schließlich im Erwärmungsgebiet sein Vorzeichen umkehrt und in diesem Sinne dann wächst, sondern daß auch $\frac{d\delta}{dt}$ mit der Temperatur zunimmt, wenn man für die Erwärmungserscheinung ein ähnliches Gesetz wie für die Abkühlung annimmt. Es würde also in diesem Falle c_p mit der Temperatur zunehmen.

Dies steht im Einklang mit den Versuchen von Mallard und Le Chatelier[1]). Die Kurven der spezifischen Wärme für Gase würden dann einen ähnlichen Verlauf zeigen, wie diejenigen, die Knoblauch[2]) und Jakob für überhitzten Wasserdampf fanden.

Eine Umkehrung des Effektes, welchen die Extrapolation unserer gefundenen Formeln ergeben, wird gestützt durch die Versuche von Olszewski[3]), allerdings können die von diesem Forscher angegebenen Werte keinen bestimmten Anhalt bieten für die Form der Nullkurve. Da immer von einem hohen Druck auf 1 at herunter gedrosselt wurde, so hat man es mit Integralwerten zu tun. Diese stehen jedoch mit der Form der Nullkurve, wie sie die van der Waalssche und Clausiussche Zustandsgleichung liefert, nicht im Einklang, sondern widersprechen derselben.

Nach der Form der Nullkurven sollte man erwarten, daß bei niederen Temperaturen von einer sehr großen Druckhöhe herab expandiert werden müßte, um eine Nullwirkung zu erzielen, und daß diese Druckhöhe mit der höheren Temperatur abnehmen würde. Olszewski findet das Gegenteil. Bei der Abdrosselung von 160 at ist nach ihm die Nullwirkung bei $+259^0$, bei jener von 20 at bei $+124^0$ C[4]).

Versuche in dieser Richtung sollen nach Untersuchung des Drosselvorganges bei tiefen Temperaturen im Laboratorium für technische Physik in München ebenfalls vorgenommen werden.

[1]) Mallard et Le Chatelier, Recherches expérimentales etc. Annales des Mines 1883 Bd. IV.

[2]) Knoblauch und Jakob, Ueber die spezifische Wärme usw. Mitteilungen über Forschungsarbeiten 1906 Heft 35.

[3]) Olszewski, Inversionstemperaturen der Joule-Kelvinschen Erscheinung für Luft und Stickstoff. Anzeiger der Akad. in Krakau 1906 S. 792 bis 796.

[4]) Versuche von Dalton (the Joule-Kelvin effect for air at 0^0 C and at pressures up to 42 atmospheres; Communications from the physical Laboratory of the University of Leiden Nr. 109c S. 23 bis 33 Jahrgang 1909) weisen darauf hin, daß bei Olszewski jedenfalls auch wie bei Natanson die Wärmeleitung zwischen Hochdruck- und Niederdruckseite des Drosselapparates einen schädlichen Einfluß ausgeübt hat.

Zusammenfassung.

1) Als Ausgangspunkt der Versuche und Untersuchungen diente die Formel von Thomson-Joule:

$$dt = \alpha \left(\frac{273}{T}\right)^2 dp,$$

welche die Temperaturveränderung eines Gases beim Strömen durch eine Drosselstelle zu rechnen gestattet.

Dabei bedeutet bei Thomson-Joule:

α eine Konstante, die von der Natur des Gases abhängt. Für Luft $\alpha = 0{,}271$; für Sauerstoff $\alpha = 0{,}333$.

T die absolute Temperatur des Gases, gemessen auf Hochdruckseite,

dp die Druckdifferenz zwischen Hochdruck- und Niederdruckseite in kg/cm².

Durch die vorliegenden Versuche ist festgestellt, daß α nicht konstant ist, sondern vom Druck abhängt und zwar linear mit zunehmendem Druck abnimmt.

Bei einer Versuchstemperatur von etwa 10° C wurde gefunden:

für Luft: $\alpha = 0{,}268 - 0{,}00086\, p$,
für Sauerstoff: $\alpha = 0{,}313 - 0{,}00085\, p$.

Dabei bedeutet p das arithmetische Mittel aus den absoluten Drücken auf Hochdruck- und Niederdruckseite in kg/cm².

2) Für Luft wurden die Versuche mit drei verschiedenen Temperaturmeßmethoden durchgeführt und der Einfluß untersucht, den verschiedene Wärmeisolierungen des Durchströmapparates zwischen Hochdruck- (bezw. Umgebung) und Niederdruckseite bei verschiedenen Drücken ausüben.

3) Die Ergebnisse der vorliegenden Versuche stimmen mit jenen anderer Experimentatoren gut überein und entsprechen den Forderungen der Thermodynamik.

4) Die für die Verflüssigung der Gase wichtige Gleichung, die zuerst von C. v. Linde aus der Thomson-Jouleschen Formel abgeleitet worden war:

$$\delta = T_1 - T = T_1 - \sqrt[3]{T_1^3 - 3\alpha (p_1 - p)},$$

wurde auf Grund der Veränderlichkeit von α neu entwickelt. Es findet sich für ein Gas, welches bei einer Temperatur T_1 vom Druck p_1 auf den Druck p herabgedrosselt wird, die Temperaturänderung:

$$\delta = T_1 - T = T_1 - \sqrt[3]{T_1^3 - 3a(p_1 - p) + {}^3/_2\, b (p_1^2 - p^2)},$$

wobei für Luft $a = 0{,}268$; $b = 0{,}00086$,
Sauerstoff $a = 0{,}313$; $b = 0{,}00085$.

5) Es wurde der Einfluß besprochen, der auf die Veränderlichkeit der spezifischen Wärmen von Gasen ausgeübt wird infolge der Aenderung von α mit dem Druck.

Buchdruckerei A. W. Schade, Berlin N., Schulzendorfer Str. 26.